



UNIVERSIDAD DE SONORA
DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD
Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos
Programa de Maestría en Ciencias y Tecnología de Alimentos

Especialidad en Almacenamiento y Procesamiento de Granos

“Características Físicas y Mecánicas de Biopelículas Elaboradas a Partir de Almidón de Trigo Cristalino (*Triticum durum*)”

TESIS

Que para obtener el Grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

Beatriz Montaña Leyva

Hermosillo, Sonora

Diciembre del 2007

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

DEL AUTOR

Este trabajo se presenta como uno de los requisitos parciales para la obtención del Grado de Maestro en Ciencias, Especialidad Almacenamiento y Procesamiento de Granos, de la Universidad de Sonora.

Se deposita en la biblioteca del Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos de la Universidad de Sonora, para ponerla a disposición de los interesados. Se puede tener autorización para reproducir y/o referirse a este escrito, en su totalidad o en parte, a través del Coordinador del Posgrado en Ciencias y Tecnología de Alimentos, cuando considere que dicha propuesta apoye al avance académico.

En cualquier otra situación se debe obtener autorización directamente del autor.

ATENTAMENTE

Q.B. Beatriz Montaña Leyva

Aprobación del Asesor

Este trabajo se aprobó en la fecha señalada:

Dra. Patricia Isabel Torres Chávez

Fecha

DEDICATORIA

A **Dios** por permitirme terminar una etapa más en mi vida, por acompañarme siempre y darme fuerzas para superarme.

A mis padres **Beatriz y José Refugio**, por apoyarme siempre, por brindarme su amor y comprensión sin límites...Dios no pudo haberme dado unos mejores padres... Porque por la fe que han puesto en mi he llegado hasta donde estoy. ¡Viejitos, los amo con todo mi corazón!

A mis hermanos **Claudia, Sandy y Carlos**, porque no me alcanzan las palabras para decir lo agradecida que estoy por la familia que tengo...Gracias por su apoyo, por compartir momentos como estos y por todo lo que nos falta por compartir.

Al clan de brujas malvadas **Zulema, Alejandra, Hiesu, Paola, Lila y Consuelo**...dicen que un amigo es un hermano que se puede escoger...para mi ustedes ya forman parte de mi familia...Gracias por estar conmigo y aguantarme durante este tiempo.

A mis roomies favoritas: **Chapis** gracias por compartir conmigo dos meses inolvidables! **Achu** que te puedo decir...voy a extrañar vivir contigo...

A **Alejandro** por su infinito apoyo y por enseñarme que la perseverancia y la constancia son la clave del éxito. Gracias por hacer que todo a tu lado parezca más fácil.

Atte: Beatriz Montaña

AGRADECIMIENTOS

A la **Universidad de Sonora**, en especial al **Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos** por permitir superarme realizando mis estudios de maestría en sus instalaciones.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** por aportar los recursos económicos para la realización del proyecto Estudio Integral de la Calidad de los trigos Mexicanos y su Uso Potencial (clave G35201-B) del cual forma parte el presente trabajo.

A la **Dra. Patricia Torres Chávez** por el tiempo, la dedicación y el esfuerzo puesto en este estudio, por su excelente asesoría y porque esto no hubiera sido posible sin la confianza y la fe que puso en mi. ¡Muchas gracias!

Al **Dr. Benjamín Ramírez Wong** por su valioso apoyo, tiempo y consejos dedicados al desarrollo de este trabajo.

A la **Dra. Maribel Plasencia Jatomea** por su gran colaboración y conocimientos aportados a esta investigación.

Al **Dr. Francisco Brown Bojórquez** por su gran apoyo en la realización de la microscopía y la difracción de rayos X.

A **Coty y Mary** por todos los miles de trámites en los que me ayudaron, gracias por facilitar mi estancia en el DIPA.

Al **Departamento de Polímeros** por permitirme llevar a cabo las determinaciones de las pruebas mecánicas.

Al **Dr. Jesús Manuel Barrón**, al **Dr. Francisco Javier Cinco** y a la **MC. Norma Violeta Parra** por hacer posible mi estancia en Kansas.

Zule, Chapis, Hiesu, Paola, Lila y Consuelo... por todas las veces que me explicaron, escucharon, ayudaron y me dieron ánimos, porque todas ustedes contribuyeron algo a este trabajo. Gracias por hacer más agradables estos años.

Porque en la realización de un trabajo de tesis no solo el estudiante tiene el mérito, si no también todas las demás personas que aportan algo por más pequeño que sea, por eso, gracias a todas las personas que directa o indirectamente me ayudaron mientras realizaba este trabajo.

Atte: Beatriz Montaña

CONTENIDO

	Página
LISTA DE TABLAS.....	ix
LISTA DE FIGURAS	x
RESUMEN.....	xii
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS.....	4
General	4
Específicos	4
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	5
Generalidades del Trigo	5
Producción mundial y nacional del trigo.....	5
Estructura del grano de trigo.....	8
Salvado	8
Germen	8
Endospermo	8
Trigo Cristalino.....	10
Almidón.....	11
Composición química del almidón	12
Amilosa	12
Amilopectina	14
Cristalinidad del almidón	14
Propiedades fisicoquímicas del almidón.....	19
Gelatinización.....	19
Retrogradación	20
Características de los Gránulos de Almidón.....	20
Distribución de tamaño de los gránulos de almidón.....	21
Propiedades de los gránulos de almidón tipo A y tipo B	22

CONTENIDO (Cont...)

	Página
Contenido de amilosa y amilopectina	22
Propiedades de gelatinización	22
Interacción amilosa-lípidos	23
Solubilidad e hinchamiento	24
Procedimientos de separación de los gránulo de almidón	24
Funcionalidad del Almidón.	25
Películas de Almidón	26
Elaboración de películas de almidón.	26
Uso de plastificantes en las películas de almidón	27
Propiedades de las Películas de almidón.	28
Solubilidad y absorción de agua	29
Propiedades mecánicas.	29
Esfuerzo y deformación.	30
Módulo de Young o módulo de elasticidad	30
Curva esfuerzo-deformación	31
MATERIALES Y MÉTODOS.	34
Materia Prima.	34
Extracción y Purificación del Almidón	33
Fraccionación del Almidón	36
Contenido de Amilosa.	36
Elaboración de las Películas	38
Determinación Analítica	39
Microscopía electrónica de barrido.	39
Propiedades mecánicas de esfuerzo-deformación.	39
Difracción de rayos X.	40
Solubilidad	40
Diseño de Experimentos y Análisis Estadístico.	41

CONTENIDO (Cont...)

	Página
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	42
Microscopía y Características Físicas	42
Propiedades Mecánicas de esfuerzo-deformación.....	48
Solubilidad.....	59
Difracción de Rayos X.....	65
CONCLUSIONES	70
RECOMENDACIONES.....	71
REFERENCIAS	72
ANEXO I	81

LISTA DE TABLAS

	Página
1. Contenido de amilosa en los diferentes tipos de gránulos de almidón	47
2. Análisis de varianza, valor de F, del efecto del tipo de gránulo y concentración de glicerol sobre el esfuerzo de tensión, elongación y módulo de elasticidad de las películas	51
3. Valores de t del efecto del contenido de amilosa y el porcentaje de glicerol sobre el esfuerzo de tensión, elongación y módulo de elasticidad de las películas.	56
4. Coeficientes de determinación (R^2) obtenidos de la regresión lineal por tipo de gránulo, considerando el contenido de amilosa y porcentaje de glicerol en las propiedades mecánicas de las películas.	57
5. Análisis de varianza, valor de F, del efecto del tipo de gránulo y concentración de glicerol sobre la solubilidad de las películas.	60
6. Valores de t del efecto del contenido de amilosa y el porcentaje de glicerol sobre la solubilidad de las películas.	63
7. Coeficientes de determinación (R^2) obtenidos de la regresión lineal por tipo de gránulo, considerando el contenido de amilosa y porcentaje de glicerol en la solubilidad de las películas	64
A-1. Valores promedio de las propiedades mecánicas evaluadas (esfuerzo de tensión, porcentaje de elongación y módulo de elasticidad) en las películas de almidón de trigo cristalino	84
A-2. Valores promedio del porcentaje de solubilidad evaluado en las películas de almidón de trigo cristalino	85

LISTA DE FIGURAS

	Página
1. Estructura del grano de trigo en sección longitudinal y transversal	9
2. Amilosa, polímero lineal compuesto de α -D-glucosa, (α -1-4)	13
3. Amilopectina, polímero ramificado compuesto de α -D-glucosa enlaces (α -1-4) y (α -1-6).	15
4. Representación esquemática de la estructura granular del almidón: gránulo con capas amorfas y cristalinas (A), vista expandida de la capa cristalina de un anillo creciente (B), estructura de la amilopectina dentro de la capa cristalina (C).	17
5. Difractograma de almidones de diferente fuente botánica de cereales (A); tubérculos (B); raíces y semillas (C); patrón característico que se da en un complejo inclusión o clatrato formado en el interior de la hélice de la amilosa (Vh).	18
6. Curva típica de esfuerzo-deformación (A) y curva con punto de fluencia típica de polímeros semicristalinos (B).	32
7. Esquema para la extracción del almidón, elaboración de las películas y su evaluación.	35
8. Diagrama de flujo de la fraccionación del almidón para la obtención de los gránulos A y gránulos B	37
9. Micrografías de las películas de almidón completo (2000 X) con 40% glicerol (A) y 25% glicerol (B)	43
10. Micrografías de las películas de los gránulos grandes (2000 X) con 40% glicerol (A) y 25% glicerol (B).	44
11. Micrografías de las películas de los gránulos pequeños (2000 X) con 40% glicerol (A) y 25% glicerol (B)	45
12. Curvas típicas de esfuerzo-deformación de las películas con 25% (A) y 40% glicerol (B). (AC) almidón completo, (GA) gránulos grandes, (GB) gránulos pequeños.	47

LISTA DE FIGURAS (Cont...)

	Página
13. Efecto del tipo del gránulo y de la concentración de glicerol sobre el esfuerzo de tensión de las películas.	52
14. Efecto del tipo del gránulo y de la concentración de glicerol sobre la elongación de las películas.	53
15. Efecto del tipo del gránulo y de la concentración de glicerol sobre el módulo de elasticidad de las películas.	54
16. Efecto del tipo de gránulo y de la concentración de glicerol sobre la solubilidad de las películas.	61
17. Difractogramas de rayos X del almidón nativo de trigo cristalino. (A) Almidón completo; (B) GA, gránulos grandes y GB, gránulos pequeños.	66
18. Difractogramas de rayos X de las películas con 40 % de glicerol.	67
19. Difractogramas de rayos X de las películas con 25 % de glicerol.	68
A-1. Curvas de esfuerzo-deformación de las películas de almidón completo. (A) 40 % y (B) 25 % glicerol.	81
A-2. Curvas de esfuerzo-deformación de las películas de los gránulos grandes (GA). (A) 40 % y (B) 25 % glicerol.	82
A-3. Curvas de esfuerzo-deformación de las películas de los gránulos pequeños (GB). (A) 40 % y (B) 25 % glicerol.	83

RESUMEN

Recientemente, el uso del almidón en la producción de materiales biodegradables se ha incrementado. Sin embargo, el almidón de trigo cristalino no ha sido evaluado con este propósito. El almidón de trigo está conformado por dos tipos de gránulos: A grandes lenticulares (10-40 μm) y B, pequeños esféricos (1-10 μm). El objetivo de este trabajo fue evaluar física y mecánicamente biopelículas elaboradas a partir del almidón de trigo cristalino (*Triticum durum*) en base a las propiedades de sus tipos de gránulos. Las biopelículas fueron elaboradas por el método “casting” utilizándose glicerol (G) como plastificante en una concentración de 25 y 40% (p/p), respectivamente. Las técnicas utilizadas fueron microscopía, pruebas de tensión (esfuerzo de tensión, ET; porcentaje de elongación, E; y módulo de elasticidad, ME), solubilidad y difracción de rayos X de polvos (DRX). Las películas obtenidas fueron transparentes, flexibles y altamente homogéneas. Las películas con 25% de G presentaron el comportamiento de un material quebradizo (ET = 42-50 MPa, E = 1.4-2.7% y ME = 31-34 MPa); mientras que las del 40% G el de un material dúctil (ET = 11-17 MPa, E = 24-41% y ME = 4-11.3 MPa). La concentración de glicerol fue el factor que significativamente afectó las propiedades mecánicas de las películas; aumentó la E, y disminuyó el ET y ME. El tipo de gránulo solo tuvo efecto en E y ME. La solubilidad de las películas fue baja comparada con otros estudios, y se incrementó con el uso de mayores concentraciones de plastificante. De acuerdo con los datos de DRX las películas mostraron una estructura semicristalina. Se lograron obtener películas a partir del almidón de trigo cristalino provenientes de Sonora y establecer que tanto el tipo de gránulo como la concentración del plastificante tiene efecto en sus propiedades.

INTRODUCCIÓN

El trigo ocupa el tercer lugar a nivel nacional en importancia alimentaria, conformando cerca del 20% de la producción total de los cereales. En México se clasifica a los trigos dependiendo de sus características físicas y químicas en 5 grupos comerciales, donde el grupo V corresponde a los trigos cristalinos (NOM, 1996). Este grupo se caracteriza por sus trigos completamente vítreos, de color ámbar, relativamente grandes y que poseen alta dureza en el endospermo.

El trigo cristalino (TC) (*Triticum durum*) es comúnmente utilizado como materia prima en la elaboración de pastas, aunque también se destina en menor medida a la preparación de otros productos. El estado de Sonora es el mayor productor nacional de trigo cristalino con aproximadamente 1.28 millones de toneladas anuales (SAGARPA, 2007). En México, el consumo directo de TC es relativamente bajo en comparación con la demanda de trigo panadero, lo que ha traído como consecuencia un excedente de producción en los últimos años. Para tratar de contrarrestar dicho problema, se ha propuesto aumentar el consumo indirecto de TC. Sin embargo, la falta de exportación ha traído como consecuencia una sobreproducción en el estado de Sonora de cerca de 250 mil toneladas, equivalentes al 10 % de la producción nacional (CANAMI, 2004; SIAP, 2004; Peña-Bautista *et al.*, 2007).

El almidón es la principal fuente de energía de las plantas y el componente más abundante del grano de trigo, constituyendo del 60 al 75% de su peso (Hoseney, 1991). Se diferencia de los demás carbohidratos en que está organizado en partículas semicristalinas conocidas como gránulos, de morfología, composición química y estructura supramolecular característica de cada especie. Además, los almidones de diferentes fuentes botánicas tienen propiedades funcionales únicas que son influenciadas por la estructura granular y molecular (Mali *et al.*, 2004; Bello-Pérez, 2005). El almidón está compuesto principalmente por dos tipos de moléculas, amilosa y amilopectina en una proporción del 15-30% y del 85-70%, respectivamente (Rodríguez *et al.*, 2001). Ambas moléculas consisten básicamente en unidades de α -D-glucosa

unidas por enlaces glucosídicos. Químicamente, se van a diferenciar por la presencia de ramificaciones: mientras la amilosa es el polímero lineal, la amilopectina, es el ramificado (You y Lim, 2000).

El almidón del grano de trigo posee dos poblaciones o tamaños de gránulos denominados gránulos A, grandes lenticulares (15–40 μm); y gránulos B, pequeños esféricos (1–10 μm). Se ha reportado que estos dos tipos de gránulos tienen composición química y propiedades diferentes, como la proporción de amilosa/amilopectina, de lípidos y proteínas, así como sus propiedades térmicas (Seib, 1994). Investigaciones muestran que el tamaño del gránulo y su distribución son características importantes para el uso del almidón, ya que tienen gran influencia sobre la funcionalidad del mismo (Raeker *et al.*, 1998). Por ejemplo, almidones con alto porcentaje de gránulos grandes son empleados en la manufactura de plásticos biodegradables y papel para copiado sin carbono (Nachtergaele y Nuffel, 1989; Peng *et al.*, 1999; Chiotelli y Meste, 2002).

Durante las últimas décadas los materiales hechos a partir del petróleo, como los plásticos, han causado un gran impacto ambiental nocivo. Se estima que la producción mundial de éstos crece un 4% anualmente (Arandes *et al.*, 2004). En México los desechos plásticos alcanzan alrededor de 2,162 mil toneladas, lo que equivale al 6.11% del total de los residuos sólidos urbanos arrojados diariamente (INEGI, 2006). Una alternativa propuesta contra dicha contaminación es la producción de materiales biodegradables.

Últimamente, el uso del almidón como materia prima en la elaboración de biomateriales se ha incrementado debido a su bajo costo y biodisponibilidad (Bastioli, 2001; Mehayar y Han, 2004; Chung y Lai, 2005; Ban *et al.*, 2006). Teóricamente, en la producción de un material termoplástico basado en almidón, su estructura semicristalina debe ser desorganizada, para la obtención de una matriz polimérica homogénea y amorfa (Zamudio-Flores *et al.*, 2006).

Existen numerosas investigaciones sobre las propiedades de las películas de almidón; sin embargo, por su alta higroscopicidad y sus propiedades mecánicas deficientes, la aplicación del almidón nativo es aún limitada (Xu *et al.*, 2004). Por lo anterior, para mejorar las propiedades de las biopelículas, el almidón debe sufrir algún tipo de modificación química, así como combinarse con otro polímero, o bien hacer uso de plastificantes (Doane y Peoria, 1992; Xu *et al.*, 2004; Ban *et al.*, 2006).

Los plastificantes en las películas de almidón actúan reduciendo las fuerzas intermoleculares; aumentan la movilidad de las cadenas de los polímeros, lo que mejora su flexibilidad y extensibilidad (Ke y Sun, 2001). Un buen plastificante debe ser compatible químicamente con el polímero para permitir una mezcla estable y homogénea. En películas de almidón, comúnmente se utilizan como plastificantes polioles como el glicerol, sorbitol y etilenglicol (Mali *et al.*, 2002; Laohakunjit y Noomhorm, 2004). Entre ellos, el glicerol es el más empleado, ya que es completamente miscible con el almidón, puede penetrar en sus moléculas, reducir los enlaces de hidrógeno y por lo tanto mejorar sus propiedades mecánicas (Yu, 1998; Laohakunjit y Noomhorm, 2004). En general, el efecto del plastificante sobre las propiedades mecánicas de las películas consiste en disminuir el esfuerzo de tensión, aumentar el porcentaje de elongación y disminuir el módulo de Young ó de elasticidad (Yu *et al.*, 1998; Ke y Sun, 2001; Yang *et al.*, 2006; Saiah *et al.*, 2007). También se ha observado que la absorción de agua en la película se incrementa proporcionalmente con el contenido de glicerol (Laohakunjit y Noomhorn, 2004; Godbillot *et al.*, 2006).

El panorama anteriormente discutido lleva al planteamiento de la utilización y aprovechamiento del almidón de TC como materia prima para la elaboración de biopelículas, con el fin de disminuir los excedentes de producción generados en el estado de Sonora, además de crear un uso alternativo para este cereal. Al mismo tiempo, la elaboración de biopelículas a base de almidón de trigo cristalino puede crear una alternativa de fabricación para los productos derivados del petróleo y asimismo disminuir el impacto ambiental nocivo que éstos generan.

OBJETIVOS

General

Evaluar las propiedades físicas y mecánicas de biopelículas plastificadas, elaboradas a partir de almidón de trigo cristalino (*Triticum durum*).

Específicos

1. Caracterizar el almidón aislado de trigo cristalino.
2. Obtener biopelículas utilizando almidón aislado de trigo cristalino.
3. Conocer el efecto del tipo de gránulo del almidón de trigo cristalino y la concentración del plastificante en la formación de biopelículas.
4. Determinar las propiedades físicas y mecánicas de las películas elaboradas.
5. Correlacionar las propiedades físicas y mecánicas con las propiedades morfológicas de las biopelículas.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Generalidades del Trigo

Desde el conocimiento más remoto en la historia, los cereales han sido considerados la columna vertebral de la agricultura debido a que son los cultivos masivos más eficientes en la producción de alimento por hectárea. Los diferentes géneros están adaptados a la mayoría de los ecosistemas del mundo. Una de las virtudes más destacadas de cultivo y producción de cereales, es que su fruto maduro es un grano no perecedero que puede ser almacenado para utilizarse como alimento, o conservado como semilla para siembras futuras (Serna-Saldívar, 1996). Entre los cereales más consumidos por el humano se encuentran el trigo, arroz, maíz, avena, cebada y centeno; siendo los tres primeros considerados los más importantes en la alimentación humana (Desroisier, 1983).

El trigo es una planta gramínea anual, pertenece al género *Triticum*, de la familia de las gramíneas; prospera en climas sub-tropicales, moderadamente templados y moderadamente fríos. La temperatura adecuada para cultivarlo varía entre 15 y 31°C, pero ésta dependerá de la etapa del desarrollo y de la variedad.

Al trigo se le puede clasificar de acuerdo al tiempo de siembra, dureza del grano, color y variedad botánica (Rodríguez, 2002). En México se clasifica a los trigos dependiendo de sus características físicas y químicas. Se manejan 5 grupos comerciales; trigos fuertes, grupo I; trigo medio fuertes, grupo II; trigos suaves, grupo III; trigos tenaces, grupo IV y trigos cristalinos, grupo V (NOM, 1996).

Producción mundial y nacional del trigo

De acuerdo con su volumen de producción, el trigo ocupa el segundo lugar en el mundo, aunque para consumo humano es el grano que tiene mayor relevancia. Alrededor del 75% del trigo se consume de manera directa, en productos como pan,

harina y pastas alimenticias, el 15% de forma indirecta en productos animales y el resto se emplea como semilla.

La producción mundial de trigo se centra en pocos países. Australia, Canadá, China, Estados Unidos, India, Pakistán, Rusia, Turquía, Ucrania y la Unión Europea concentran poco más del 80% de esa producción (Galarza-Mercado *et al.*, 2005). En el año 2006, la producción mundial de trigo fue de casi 598 millones de toneladas. De acuerdo a reportes de la FAO (2007), la producción para el 2007 alcanzará hasta 626 millones de toneladas.

El trigo cristalino se cultiva en todo el mundo en alrededor de 17 millones de hectáreas, de las cuales el 50% es de los países en desarrollo. La producción de este tipo de trigo se agrupa en el Oriente Medio, India, la región mediterránea de Asia Occidental y el norte de África, en donde se concentra el 80% de dicho cereal. Otras zonas productoras se encuentran en Etiopía, Argentina, Chile, Rusia, Kazajstán, así como México, Estados Unidos, Italia, España y Canadá producción (Galarza-Mercado *et al.*, 2005). La producción mundial de trigo cristalino ocupa cerca del 6% de la total y de acuerdo al Consejo Internacional de Granos (CIG), para el ciclo 2006-7 será de alrededor de 35 millones de toneladas, 1.3 millones de toneladas menos que el año pasado (USWA, 2006).

En el ámbito internacional, México tiene escasa participación en cuanto a producción de trigo se refiere; sin embargo, es el principal productor del grano de América Central y el Caribe. El cultivo del trigo está en prácticamente todos los estados de la República Mexicana, entre los cuales destacan Sonora, Guanajuato, Sinaloa y Baja California por la alta participación de las superficies que se destinan a este cultivo y el nivel de producción. La producción nacional de trigo en el año 2006 se ubicó en 3.24 millones de toneladas, siendo los principales estados productores Sonora, Baja California, Guanajuato, Jalisco, Michoacán y Tlaxcala, que en conjunto sumaron el 87% de la producción total (SIAP, 2006).

A nivel nacional, el trigo se cultiva principalmente en el ciclo Otoño-Invierno. Esto se debe a las condiciones climatológicas que prevalecen en esa época del año, como mayor humedad y temperaturas templadas, condiciones básicas para el adecuado desarrollo del cultivo en los estados del noroeste y norte del país. En el 2006 se obtuvo alrededor del 91% de la producción del año agrícola, destacando el estado de Sonora con el 54%, Baja California con el 17% y Guanajuato con el 13% de la producción total obtenida. El ciclo primavera-verano participó con el 9% del total de la producción dentro del año agrícola, destacando Tlaxcala con 46%, Guanajuato con 14%; y México y Zacatecas con el 13% cada uno (SIAP, 2006).

En el año 2005, el trigo cristalino representó el 44.4% de la producción total nacional, predominando los estados de Sonora y Baja California, quienes participaron con el 65.3% y 30.8%, respectivamente (SIAP, 2006). Para el año 2006, la producción de trigo cristalino en Sonora ascendió a 1.28 millones toneladas (SAGARPA, 2007). En el estado de Sonora, existe una preferencia por el cultivo de trigo cristalino sobre el del trigo panadero (*Triticum aestivum*), ya que presenta mayor resistencia al hongo del carbón parcial (*Tilletia indica*), el cual se mantiene como una enfermedad latente en el sur de Sonora.

El consumo directo de trigo cristalino en México es relativamente bajo en comparación con la demanda de trigo panadero, lo que ha traído como consecuencia en los últimos años, un excedente de producción de dicho cereal. Como medida de control para los excedentes generados de trigo cristalino, se ha propuesto el aumento del consumo indirecto (productos animales); a pesar de esto, la falta de exportación ha creado una sobreproducción solo en el estado de Sonora de cerca de 250 mil toneladas, equivalentes al 10% de la producción nacional (CANAMI, 2004; SIAP, 2004; Peña-Bautista *et al.*, 2007).

Estructura del grano de trigo

El tamaño de los granos de trigo varía según el tipo de trigo, pero en promedio pesa cerca de 35 mg con una longitud de 8 mm; tienen su parte dorsal redonda y lisa, a excepción de una hendidura o surco que se encuentra sobre el área del germen (Hoseney, 1991). En la Fig. 1 se muestra la estructura del grano de trigo en sección longitudinal y transversal. Estructuralmente, el grano consiste en tres partes anatómicas principales: el afrecho o envoltente (salvado), el germen o embrión y el endospermo.

Salvado. Es la parte externa del grano, sirve de cubierta protectora y constituye alrededor del 14% del grano. Está formado por el pericarpio, cubierta de la semilla y epidermis nucelar y se caracteriza por tener alto contenido de fibra, cenizas y carecer de almidón. El salvado se destina principalmente a alimentos para animales y sólo en pequeñas cantidades para consumo humano, como fuente de fibra dietaria.

Germen. Es la fracción más pequeña constituyendo del 2.3-2.5% del grano. Se encuentra en la parte dorsal del grano y se compone de dos partes principales que son el eje embrionario (o embrión) y el escutelo, los cuales funcionan como almacén de nutrientes. El germen se caracteriza por carecer de almidón y por su alto contenido de aceite; además, genera la mayoría de las enzimas para el proceso de germinación. (Hoseney, 1991).

Endospermo. Se compone principalmente de almidón y proteína; constituye alrededor del 83 % del grano y está formado por tres tipos de células: periféricas, prismáticas y centrales. La primera fila de células, son las periféricas. Estas células son generalmente pequeñas, se caracterizan por su alto contenido proteico y por tener unidades de almidón pequeñas, angulares y compactas.

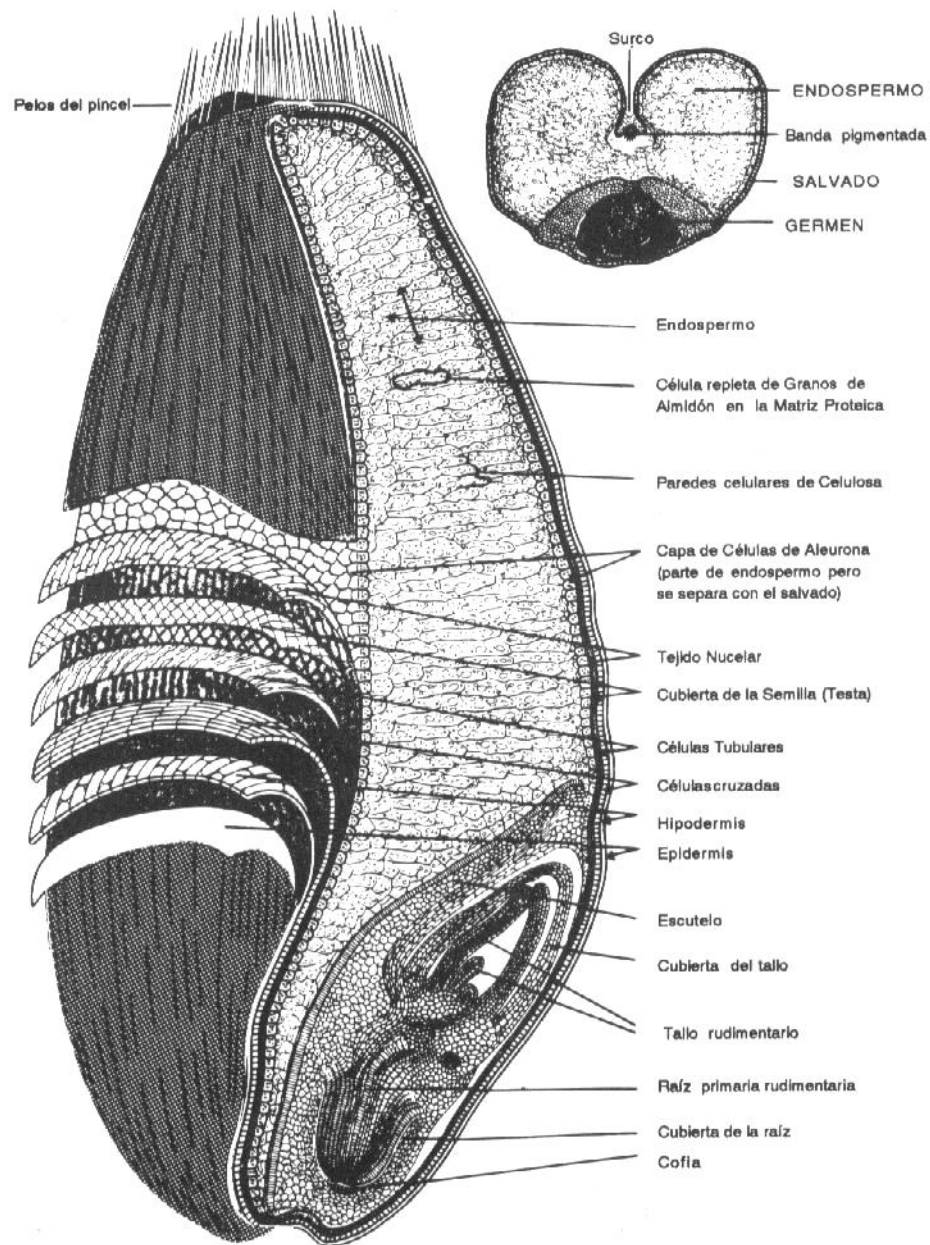


Fig. 1. Estructura del grano de trigo en sección longitudinal y transversal.
Fuente: Hoseney, 1991.

Las células prismáticas (considerado como endospermo vítreo) están constituidas por paredes celulares, gránulos de almidón, matriz y cuerpos proteicos. Aquí los gránulos de almidón ocupan la mayor parte del espacio de la célula, están rodeados y separados por la matriz proteica y los cuerpos proteicos, los cuales se encuentran en su mayoría incrustados en la membrana de los gránulos de almidón, lo que mantiene la estructura interna de la célula. En los granos de trigo cristalino existe una fuerte adherencia entre la proteína y el almidón. La matriz proteica no solamente cubre al almidón sino que estos se encuentran unidos fuertemente. La fuerza del enlace proteína-almidón parece explicar la dureza del grano (Hoseney, 1991). En las células del endospermo vítreo no existen espacios de aire, ya que los gránulos de almidón están bien recubiertos por la matriz proteica, por lo que adquieren formas angulares (poligonales). Esta estructura tiene una apariencia vítrea o traslúcida debido a que la luz no es difractada cuando pasa a través del endospermo.

Por último, las células centrales (del endospermo almidonoso) quedan en el interior de las células prismáticas; siendo su tamaño y forma más irregular. Éste contiene las mismas estructuras del endospermo vítreo, pero las unidades de almidón son de mayor tamaño y menos angulares. La asociación entre los gránulos de almidón y la matriz proteica es más débil y las unidades de almidón tienen menos incrustaciones de los cuerpos proteicos. En las células centrales existe la presencia de minúsculos espacios de aire que dan al endometrio su apariencia almidonada u opaca.

Trigo Cristalino

Tradicionalmente el trigo cristalino (TC) es el cereal más apropiado para la elaboración de productos de pasta de alta calidad (Vansteelandt y Delcour, 1999). Existen numerosas variedades de trigos cristalinos y todos los granos se identifican por ser completamente vítreos, de color ámbar, relativamente grandes, con elevado contenido proteína y alta dureza en el endospermo. Debido a la tendencia del grano de ser vítreo y duro, se facilita la producción de la semolina, que se utiliza para fabricar

pastas (El-Khayat *et al.*, 2003). Otra particularidad importante, es que el endospermo contiene un relativamente alto contenido de carotenoides dando un tono amarillo; por esta razón los productos hechos a partir de trigo cristalino son de ese color (Fabriani y Lintas, 1998).

Almidón

El almidón es el principal carbohidrato de reserva sintetizado por las plantas superiores, constituyendo una fuente de energía esencial para muchos organismos; especialmente el hombre. La síntesis del almidón sucede en los amiloplastos, dentro de los plastidios; a partir del dióxido de carbono atmosférico y agua. En este proceso se absorbe la energía solar y se almacena en forma de glucosa, dándose uniones entre estas moléculas para formar largas cadenas que pueden llegar a tener hasta 2000 o 3000 unidades de glucosa (Gómez, 2003).

El almidón es la principal reserva de energía en el mundo vegetal y desde el punto de vista nutricional, constituye la fuente primordial de carbohidratos en la dieta humana. Además de su valor nutritivo, el almidón se considera importante ya que tiene efecto en las propiedades fisicoquímicas de numerosos alimentos.

En el trigo, el almidón constituye dos terceras partes del peso del grano seco, dependiendo de la variedad (Hucl y Chibbar, 1996). Se diferencia de los demás hidratos de carbono presentes en la naturaleza en la organización en partículas conocidas como gránulos, cuya morfología composición química y estructura supramolecular (arreglo relativo de las macromoléculas en el estado sólido) son características de cada especie (Bello-Pérez, 2005). Estos gránulos son relativamente densos e insolubles en agua fría, aunque pueden dar lugar a suspensiones cuando se dispersan en el agua (Gómez, 2003).

Composición química del almidón

El almidón es un polímero compuesto esencialmente por glucosa. Aunque también puede contener, en muy pocas cantidades, oligoconstituyentes o contaminantes no eliminados completamente durante el proceso de extracción. Asociados con el almidón de los cereales, pueden existir lípidos generalmente polares y minerales como el fósforo y nitrógeno.

Este polímero está constituido por dos tipos de moléculas: amilosa y amilopectina en una proporción del 15-30% y del 85-70%, respectivamente (Rodríguez *et al.*, 2001). Ambas moléculas consisten básicamente en unidades α -D-glucosa unidas por enlaces glucosídicos y químicamente, se diferencian en la presencia de ramificaciones: mientras la amilosa es el polímero lineal, la amilopectina, es el ramificado (You y Lim, 2000). La proporción relativa de ambos polisacáridos varía según la procedencia del almidón, y por lo general la amilopectina es la más abundante.

Amilosa. Es un polímero esencialmente lineal formado por monómeros de α -D-glucosa unidos por enlaces α -1-4 (Fig. 2). Sin embargo, se ha demostrado la presencia de cierta cantidad de enlaces α -1-6 (menos del 1%) encontrándose de manera espaciada e infrecuente, por lo que la amilosa se comporta como un polímero lineal (Hood, 1982; Ball *et al.*, 1996). El peso molecular es de 250000 Da; pero puede variar dependiendo la especie y estado de maduración de la fuente botánica.

La naturaleza lineal y la presencia de los enlaces (α -1-4) hacen a la amilosa susceptible de formar complejos con moléculas hidrofóbicas como el yodo, ácidos grasos o hidrocarburos, adquiriendo una estructura secundaria característica de forma helicoidal en la que cada vuelta de la hélice comprende seis unidades de glucosa. En estos complejos los grupos hidrofílicos de la cadena están orientados hacia el exterior y los hidrófobos para el interior de la cavidad (Hoseney, 1991; Thomas y Atwell, 1999;

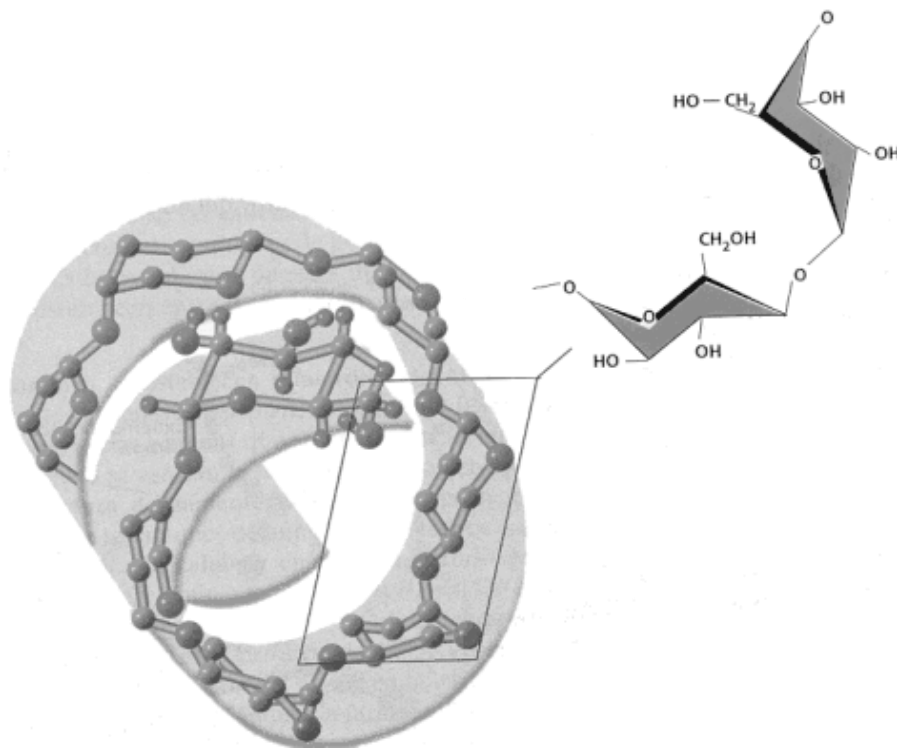


Fig. 2. Amilosa, polímero lineal compuesto de α -D-glucosa, (α -1-4).
Fuente: UMU, 2005.

Bello-Pérez, 2005). La amilosa tiene una fuerte tendencia a asociarse consigo misma y precipitarse en solución por lo que se cristaliza o se retrograda fácilmente, lo que dificulta su manejo (Hoseney, 1991).

Amilopectina. Es el polímero ramificado del almidón, que además de las uniones α -1-4 tiene uniones α -1-6 (Fig. 3). Las uniones α -1-6 se encuentran regularmente espaciadas en cada 25 a 30 residuos de glucosa y son los puntos de ramificación en la estructura. Cada rama contiene únicamente uniones α -1-4. El peso molecular de la amilopectina varía entre 10^6 y 10^8 Da, dependiendo del origen botánico; haciéndola una de las moléculas más grandes en la naturaleza.

Debido a la naturaleza ramificada de la amilopectina, sus propiedades son diferentes a las de la amilosa.; por ejemplo, en ella la retrogradación es más lenta y la formación de geles se da con diferente textura (Thomas y Atwell, 1999). Además, las películas basadas en amilopectina son débiles y quebradizas mientras que las elaboradas a partir de amilosa son fuertes y flexibles (Zobel, 1988).

Cristalinidad del almidón

Análisis de rayos X han mostrado que el gránulo de almidón se presenta de manera semi-cristalina (conformado por regiones amorfas y cristalinas) llegando a tener entre un 20 y 40% de cristalinidad (Jenkins *et al.*, 1993; Jacobs y Delcour, 1998).

La parte amorfa del almidón está constituida esencialmente por la amilosa, mientras que la región cristalina se conforma por cúmulos paralelos de cadenas cortas (50-60Å) en la amilopectina; la cual a su vez, presenta regiones amorfas y regiones altamente cristalinas arregladas en capas concéntricas. Las regiones amorfas están asociadas a los puntos ramales de la amilopectina, y la región cristalina a los planos formados por los cúmulos y las cadenas lineales de amilosa en la molécula de la

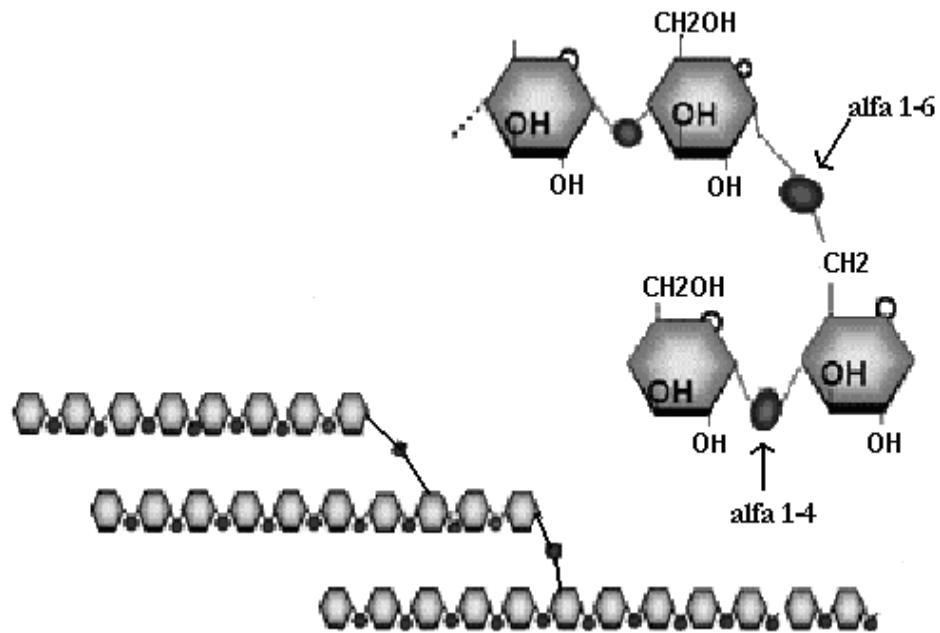


Fig. 3. Amilopectina, polímero ramificado compuesto de α -D-glucosa enlaces (α -1-4) y (α -1-6).

Fuente: UN, 2005.

amilopectina. En la Fig. 4 se exhibe la estructura granular del almidón, mostrando las capas amorfas y cristalinas, así como la distribución de la amilopectina dentro de la capa cristalina.

La relación entre las estructuras amorfas y cristalinas dan como resultado un patrón típico de difracción de rayos X que puede ser usado para diferenciar almidones (Bello-Pérez, 2005). Katz y Van-Itallie (1930) fueron los primeros en realizar estudios de difracción por rayos X para distinguir los principales tipos de patrones de la estructura cristalina de los gránulos del almidón. Actualmente se ha aceptado que los almidones de cereales presentan un patrón cristalino tipo A (celda monoclinica) con las dobles hélices densamente empacadas en la celda unitaria. Los almidones de tubérculos dan un patrón tipo B (celda hexagonal) en el cual las dobles hélices empacadas en modo paralelo están combinadas con la estructura del agua. Los almidones de ciertas raíces y semillas presentan un patrón cristalino tipo C, y se piensa que es una mezcla intermedia del patrón tipo A y B. Otro tipo de patrón es el V, característico por la formación de un complejo de inclusión o clatrato en el interior de la hélice de la amilosa (Fig. 5) (Rodríguez *et al.*, 2001).

Como se mencionó anteriormente, se puede obtener información sobre la estructura cristalina de un material utilizando difracción de rayos X. Cuando un haz monocromático (de una sola longitud de onda) del mismo orden de magnitud que el espaciamiento atómico del material lo golpea, los rayos X se dispersan en todas direcciones. La mayor parte de la radiación dispersada por un átomo anula la dispersada por otros átomos. Sin embargo, los rayos X que inciden sobre ciertos planos cristalográficos, en ángulos específicos, se ven reforzados en vez de eliminados. Este fenómeno se como conoce como difracción y se da cuando las condiciones satisfacen la ley de Bragg (Azkeland, 1998). Debido a la difracción ocurrida se da un patrón de intensidades que puede interpretarse según la ubicación de los átomos en el cristal.

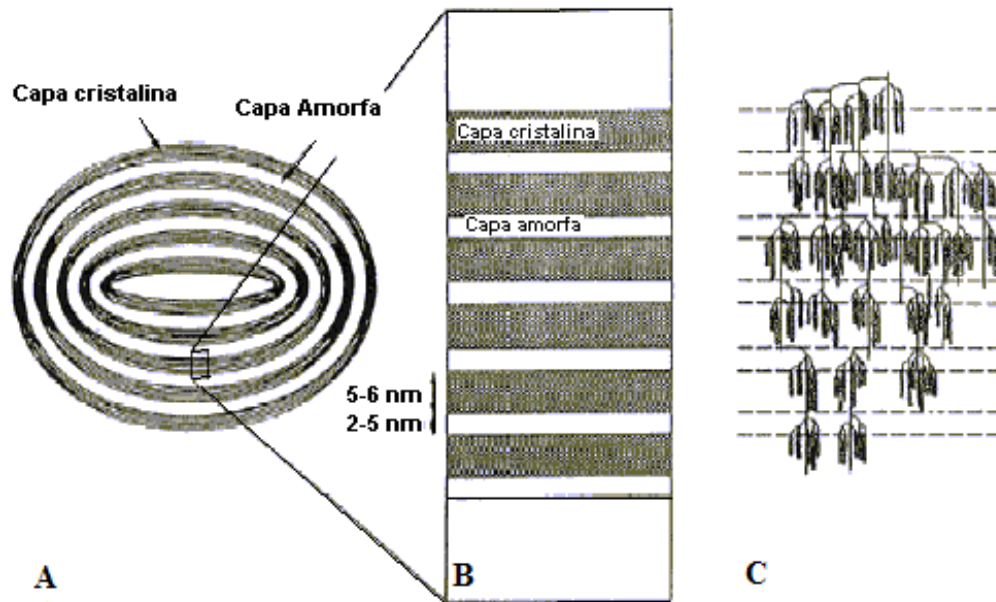


Fig. 4. Representación esquemática de la estructura granular del almidón: gránulo con capas amorfas y cristalinas (A), vista expandida de la capa cristalina de un anillo creciente (B), estructura de la amilopectina dentro de la capa cristalina (C).
Fuente: Jacobs y Delcour, 1998.

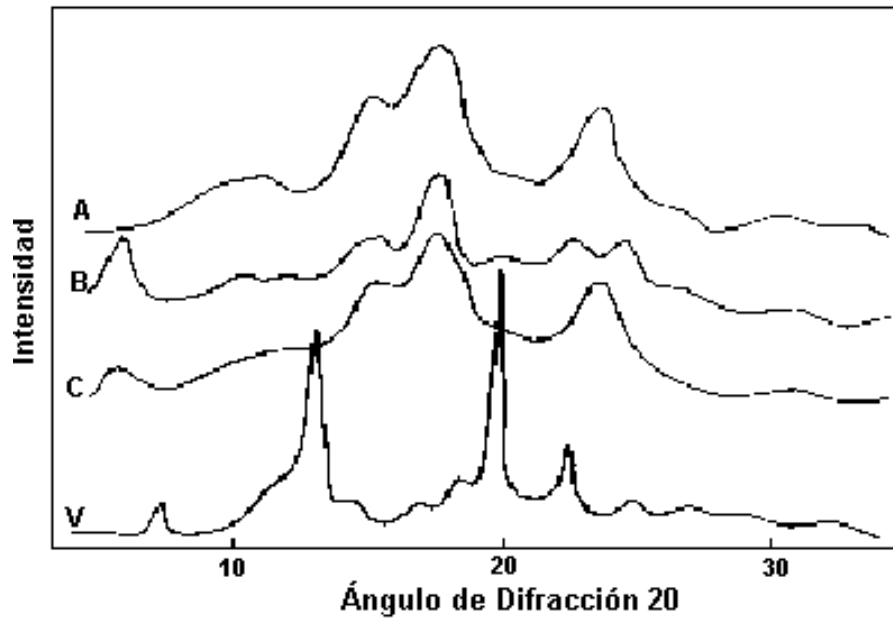


Fig. 5. Diffractograma de almidones de diferente fuente botánica de cereales (A); tubérculos (B); raíces y semillas (C); patrón característico que se da en un complejo inclusión o clatrato formado en el interior de la hélice de la amilosa (V).

Fuente: Bello-Pérez, 2005.

Propiedades fisicoquímicas del almidón

El almidón, en presencia de agua y temperatura, experimenta una serie de transiciones térmicas que son directamente responsables de los usos industriales del mismo (Collado *et al.*, 1999; Lu, 2006). Éstas propiedades, que incluyen la fusión de los cristalitos, la gelatinización y retrogradación; entre otras, están relacionadas con el tiempo de cocimiento del almidón, la dimensión de sus gránulos y el tamaño molecular de los polímeros del almidón, así como sus cantidades relativas (Bao *et al.*, 2001).

Gelatinización. La gelatinización es una transición en la que se absorbe calor y se pasa de un estado ordenado a uno desordenado (Fennema, 2000). Se caracteriza por provocar cambios irreversibles en las propiedades del almidón, como el hinchamiento del grano, fusión de los cristalitos, pérdida de birrefringencia y solubilización. Estas propiedades son dependientes de la temperatura y humedad del gránulo de almidón (Thomas y Atwell, 1999).

El proceso de gelatinización se da cuando los gránulos de almidón insolubles en agua fría son calentados por encima de una temperatura determinada (pérdida de birrefringencia), llamada temperatura de gelatinización (Fennema, 2000). Aquí, inicialmente los gránulos absorben agua lentamente en las áreas amorfas debido a que son las menos organizadas (sus puentes de hidrógeno no son tan rígidos ni numerosos como en las áreas cristalinas). Como consecuencia del aumento de temperatura, las moléculas de almidón vibran vigorosamente, ocasionando el rompimiento de las uniones intermoleculares. Esta ruptura permite que el agua penetre fácilmente al gránulo de almidón reteniéndola, provocando el hinchamiento del mismo hasta alcanzar un volumen máximo; esto trae como consecuencia la destrucción parcial del gránulo de almidón y la dispersión de la amilosa en la solución (Genovese y Rao, 2003).

La penetración del agua también genera la separación de las cadenas del almidón en segmentos, incrementando la aleatoriedad en la estructura general; por lo que el número y el tamaño de las regiones cristalinas decrecen. El calentamiento

continuo en presencia de abundante agua provoca la pérdida de la cristalinidad, por ende la birrefringencia y la naturaleza del patrón de difracción de rayos X.

Retrogradación. La retrogradación puede concebirse como el fenómeno opuesto a la gelatinización. Se define como un proceso que ocurre cuando las moléculas del almidón y los fragmentos granulares que permanecen en solución después de la gelatinización, comienzan a reasociarse en una estructura ordenada a través de puentes de hidrógeno, dando la formación de un gel rígido (Atwell *et al.*, 1988; Sandoval *et al.*, 2005). En sus etapas iniciales, dos o más cadenas forman un punto de unión; que bajo condiciones favorables, pueden dar lugar a un orden cristalino (Thomas y Atwell, 1999).

La retrogradación del almidón incluye tanto a la amilosa como la amilopectina, aunque la primera sufre este proceso de manera mucho más rápida que la segunda (Fennema, 2000). Además, la retrogradación es más significativa en la fracción de amilosa debido a que su estructura lineal permite una mayor cohesión entre las moléculas de almidón (Harper, 1981). La velocidad de retrogradación depende de diversas variables como la relación molecular de amilosa/amilopectina, las estructuras moleculares de las mismas que vienen determinadas por la fuente botánica del almidón, la temperatura, la concentración de almidón, entre otras (Fennema, 2000).

Características de los Gránulos de Almidón

Estudios de microscopía en almidón han revelado que todos los gránulos poseen una hendidura llamada *hilum*, punto alrededor del cual se desarrolla el gránulo de almidón. El *hilum* se presenta en la mayoría de las veces en el centro del gránulo, y se ha encontrado alrededor de él, la formación de capas concéntricas que envuelven al gránulo de almidón en forma parcial o total (Fennema, 1996). Bajo la luz polarizada, los gránulos presentan la apariencia de esferocristales distorsionados con un típico transversal oscuro interceptando el hilum, comúnmente conocida como la cruz de malta.

Dicha característica implica la existencia de un alto grado de orientación molecular dentro del gránulo sin referencia a ninguna forma cristalina (Lineback, 1984).

Con respecto al tamaño y la forma de los gránulos de almidón se ha encontrado que éstos son capaces de variar en composición: proporción de amilosa/amilopectina; tamaño (de menos de 1 μm a más de 100 μm) (Ellis *et al.*, 1998); forma (alargados, esféricos, elípticos, ovoides, irregulares y lenticulares); y funcionalidad, cuando se obtienen de diferentes fuentes botánicas.

Distribución de tamaño de los gránulos de almidón

La distribución de los gránulos de almidón se clasifica generalmente como monomodal y bimodal, dependiendo de la fuente extraída (Lindeboom *et al.*, 2004). Numerosas investigaciones demuestran que el almidón de trigo posee una distribución bimodal debido a que contiene dos tipos de gránulo llamados tipo-A y tipo-B. Dichos gránulos se clasifican de acuerdo al tiempo de biosíntesis, tamaño y forma (Evers, 1971; Morrison y Scott, 1986; Stoddard, 1999; Bechtel y Wilson, 2000; Shinde *et al.*, 2003).

En el almidón de trigo, los gránulos A son de forma lenticular con un diámetro promedio de 10-40 μm y contribuyen a más del 70% del peso total del almidón y cerca del 3% del número total de gránulos en el endospermo. Se cree que la síntesis de los gránulos A comienza en los amiloplastos, cuatro días después de la floración y continúan desarrollándose durante 20 días. Por otro lado, los gránulos B son de forma esférica o poligonal, y van de 1-10 μm en diámetro. Estos gránulos equivalen a más del 90% del número total de gránulos pero menos del 30% del peso total del almidón en el trigo. La síntesis de los gránulos B inicia 10 días después de la floración, habiendo crecimiento significativo del gránulo a los 20 días (Evers, 1973; Morrison y Gadan, 1987; Bechtel *et al.*, 1990; Shinde *et al.*, 2003).

Además de los gránulos tipo A y B, Bechtel *et al.* (1990) han reportado la existencia de una tercera clasificación de gránulos pequeños en el almidón de trigo, el tipo C (<5 µm), que inicia 21 días después de la floración. Sin embargo, no está bien establecido si los gránulos tipo C representan una clase distinta o simplemente constituyen una iniciación tardía de los gránulos tipo B, por lo que la mayoría de los estudios publicados han considerado al almidón de trigo solamente constituido por dos tipos de gránulos (Peng *et al.*, 1999; Shinde *et al.*, 2003).

Propiedades de los gránulos de almidón tipo A y tipo B

La composición química del almidón, gelatinización, propiedades de cocimiento, susceptibilidad enzimática, cristalinidad, hinchamiento y solubilidad son afectadas por el tamaño del gránulo. Sin embargo, algunos otros factores, incluyendo la proporción de amilosa/amilopectina, el peso molecular y la estructura fina del gránulo, también tienen influencia sobre dichas propiedades (Lindeboom, 2004); lo cual ayuda a establecer sus posibles usos y aplicaciones tanto en la industria alimentaria como en la no alimentaria.

Contenido de amilosa y amilopectina. Algunos reportes muestran que la concentración de amilosa en los gránulos tipo A es mayor que la de los gránulos tipo B (Raeker *et al.*, 1998; Peng *et al.*, 1999; Takeda *et al.*, 1999), mientras que otros investigadores han encontrado la misma concentración de amilosa en ambos gránulos (Evers *et al.*, 1974; Myllärinen *et al.*, 1998). Estas variaciones en los resultados probablemente se deben al método utilizado; aunque también se ha encontrado que la variación de la estructura molecular de la amilosa y amilopectina puede explicar muchas de las contradicciones aparentes en la literatura, ya que varía entre los diferentes tamaños de gránulos (Lindeboom, 2004).

Propiedades de gelatinización. Las propiedades de gelatinización del almidón están relacionadas a factores de variedad incluyendo, el tamaño, proporción y tipo de

organización cristalina, y la ultra-estructura del gránulo de almidón (Lindeboom *et al.*, 2004). Algunas investigadores muestran que en almidones bimodales como el trigo y la cebada, los gránulos pequeños gelatinizan a temperaturas mayores y sobre un rango de temperatura más amplio que los gránulos grandes (Eliasson y Karlsson 1983; Myllärinen *et al.*, 1998; Chiotelli y Meste, 2002). Stevens y Elton (1971), encontraron que el pico de gelatinización para los gránulo pequeños en almidón de trigo (*Triticum aestivum*) fue alrededor de 3.0° C mayor que en los gránulos grandes (Campbell, 1996).

De acuerdo a Eliasson y Karlsson (1983), la entalpía de gelatinización del almidón de trigo es independiente de la distribución de tamaño de gránulos. Sin embargo, Peng *et al.* (1999), encontraron que los gránulos de almidón tipo A tienen mayores entalpías de gelatinización que los tipo B. Estos valores más bajos de entalpía para la gelatinización de los gránulos pequeños sugieren que poseen una menor proporción de estructuras organizadas en comparación con los gránulos grandes. Chiotelli y Le-Meste (2002), mostraron por medio de difracción de rayos X, que los gránulos grandes son un tanto más cristalinos que los pequeños. Vasanthan y Bhatti (1996), también obtuvieron resultados similares en almidones bimodales como el de cebada. Estos autores reportaron que los gránulos grandes tuvieron en sus patrones de difracción de rayos X, mayor porcentaje de intensidades relativas en los picos (una intensidad más alta indica un mayor grado de cristalinidad). No obstante, Chiotelli y Le-Meste (2002), mostraron que el material cristalino en los gránulos tipo B parece tener una mayor estabilidad (cristalitos más perfectos) que los gránulos tipo A porque la transición de la fusión de los cristalitos comienza a temperatura ligeramente mayores y a una velocidad más baja.

Interacción amilosa-lípidos. Se ha reportado que en almidón de trigo, el contenido de lípidos es mayor en los gránulos pequeños así como la entalpía de disociación del complejo amilosa-lípidos (Myllärinen *et al.*, 1998; Raeker *et al.*, 1998; Chiotelli y Meste, 2002).

Solubilidad e hinchamiento. De acuerdo a Zheng y Sosulski (1997), el poder de hinchamiento del almidón está asociado más con la estructura del gránulo y la composición química (especialmente con el contenido de amilosa y lípidos), que con el tamaño del gránulo. Se ha visto que mayores cantidades del complejo amilosa-lípidos pueden inhibir el hinchamiento y la gelatinización (Zheng y Sosulski, 1997). Sin embargo, los gránulos B están asociados con un rango de absorción de agua superior, hidratación más rápida y un mayor hinchamiento que los gránulos A. De acuerdo a Chiotelli y Meste (2002), la razón de esto puede ser un menor arreglo cristalino de las cadenas de los polisacáridos en los gránulos B (una mayor proporción de las zonas amorfas más accesibles al agua).

Por otro lado se ha visto que la solubilidad en los gránulos de almidón aumenta con un mayor contenido de amilosa. Esto se debe a que durante el proceso de gelatinización la amilosa se solubiliza y sale del gránulo hinchado, pasando a la fase continua (Thebaudin *et al.*, 1998).

Procedimientos de separación de los gránulos de almidón

Debido a que las propiedades que presentan los distintos tipos de gránulos de almidón son características importantes para establecer la aplicación en la industria alimentaria y en la no alimentaria, es esencial el desarrollo de métodos que separen eficientemente los diferentes tipos de gránulos. Hoy en día se han utilizado varios procedimientos para lograr la separación de ellos, entre los cuales se encuentran el microtamizado (Ever 1973), la sedimentación (Morrison y Gadan 1987), y la elutriación (McGregor, 1979). Otro método utilizado recientemente es la centrifugación del almidón en una solución de sacarosa o maltosa. Este procedimiento da como resultado la separación de los gránulos de almidón con una población homogénea de gránulos B (Peng *et al.*, 1999).

Funcionalidad del Almidón

El almidón es uno de los polímeros más económicos, abundantes y versátiles en la naturaleza (Ban *et al.*, 2006). Su producción mundial total se calcula en 18 millones de toneladas, las cuales se extraen principalmente de maíz (10 millones) y papa (3 millones); el resto se obtiene del trigo, arroz, yuca y sorgo.

El almidón se puede utilizar tanto en su forma nativa como modificada, suministrando cada uno de los distintos tipos de almidones, características diferentes a los productos. Es usado frecuentemente como ingrediente funcional en gran variedad de productos alimenticios: como espesante, agente enlazador de agua, estabilizante de espumas, gelificante, aglutinante, texturizante y sustituto de grasa, entre otras aplicaciones (Mauro, 1996).

Además de su aplicación alimentaria, el almidón es utilizado en la fabricación de pegamentos, pinturas, papel, pañales, detergente, como materia prima en la industria farmacéutica y para la obtención de biocombustibles (Bello-Pérez, 2005). También en el ámbito ecológico el almidón ha empezado a jugar un papel importante en la fabricación de materiales biodegradables y empaques comestibles (Lawton *et al.*, 1996; Ban *et al.*, 2005; Thunwall *et al.*, 2006).

Algunas investigaciones muestran que en el almidón, el tamaño del gránulo y su distribución son características importantes para la aplicación del mismo, debido a que el tamaño del gránulo puede influenciar directamente su composición química y por lo tanto afecta su funcionalidad (Raeker *et al.*, 1998). Por ejemplo, los almidones en donde predominan los gránulos pequeños ($\approx 2 \mu\text{m}$ en diámetro, o similares en tamaño a las micelas de los lípidos) pueden ser utilizados como sustitutos de grasa (Lim *et al.*, 1992), mientras que almidones con alto porcentaje de gránulos grandes tienen aplicaciones en la manufactura de plásticos biodegradables y papel para copiado sin carbono (Nachtergaele y Nuffel, 1989; Peng *et al.*, 1999; Chiotelli y Meste 2002).

Películas de Almidón

Debido al gran crecimiento de la población y a la manera de vida más práctica que se ha adquirido últimamente, la contaminación por productos plásticos ha aumentado a tal grado que se ha convertido en un tema de interés profundo (Larotonda *et al.*, 2004). Se estima que la producción de plásticos crece un 4% anualmente (Arandes *et al.*, 2004); comúnmente éstos materiales son fabricados a partir del petróleo y tienen la característica de no ser biodegradables (Ban *et al.*, 2006). Las estadísticas muestran que cientos de toneladas de residuos sólidos urbanos son descargados al ambiente diariamente. En México, alcanzan cerca de 34,602 mil toneladas, ocupando los desechos de plásticos alrededor de 2,115 mil toneladas (6.11% del total) (INEGI, 2006). Unas alternativas propuestas para minimizar dicho impacto ambiental son el reciclaje y la sustitución de los plásticos convencionales por biodegradables (Webb-Jenkins, 2002).

En las últimas décadas, el uso del almidón como materia prima para la producción de materiales biodegradables como películas comestibles, empaques alimenticios, bolsas para composta entre otros, ha ido incrementándose; llegando a ocupar del 85 al 90% de este mercado (Bastioli, 2001; Novamont, 2001; Mehryar y Han, 2004; Chung y Lai, 2005); ya que además de ser uno de los polímeros más abundantes y versátiles, tiene bajo costo, no es alergénico y estudios anteriores han demostrado que es completamente biodegradable (Pagella *et al.*, 2000; Ban *et al.*, 2006).

Elaboración de películas de almidón

El almidón es utilizado en una gran cantidad de productos que requieren gelatinización por calentamiento previo a su uso. Por lo que las propiedades térmicas del almidón son parámetros importantes en su procesamiento, sobre todo cuando se procesa como termoplástico para la obtención de biopelículas. Teóricamente, en la producción de un material termoplástico basado en almidón, su estructura semi-

cristalina debe ser desorganizada, para la obtención de una matriz polimérica homogénea y amorfa (Zamudio-Flores *et al.*, 2006).

El almidón nativo puede ser convertido en material termoplástico por métodos convencionales como extrusión o inyección de molde; asimismo puede utilizarse la técnica de “casting” que se basa en el calentamiento del almidón en exceso de agua, causando el hinchamiento irreversible de los gránulos. Este proceso viene acompañado de la pérdida de la estructura cristalina nativa y de la solubilización de la amilosa; fenómeno conocido como gelatinización (Thiré y Andrade, 2005).

En la actualidad, un gran número de investigaciones han analizado las propiedades de las películas basadas en almidón. Sin embargo, la aplicación del almidón puro es aún limitada debido a la sensibilidad de sus propiedades, a las fluctuaciones de la humedad (alta higroscopicidad), al envejecimiento y a que sus propiedades mecánicas no son tan buenas cuando es comparado con productos similares ya existentes en el mercado (Xu, 2004; Thunwall *et al.*, 2006).

Por esta razón para mejorar las propiedades de las biopelículas, el almidón debe sufrir algún tipo de modificación ya sea químicamente por sustitución, copolimerización, oxidación, hidrólisis, entre otros. Además de modificarlo, el almidón puede ser utilizado combinándose con otros polímeros sintéticos como es el polietileno de baja densidad (Dufresne y Vignon, 1998). Del mismo modo, los plastificantes son utilizados para mejorar las propiedades mecánicas de las películas (Doane y Peoria, 1992).

Uso de plastificantes en las películas de almidón

Un plastificante generalmente se define como “una sustancia no volátil de alto punto de ebullición, que al ser agregada a otro material cambia las propiedades físicas o mecánicas de ese material” (Habig-McHught y Krochta, 1994). Los plastificantes juegan un papel muy importante en la formación de las películas de almidón afectando

la estructura de la película y, por lo tanto sus propiedades (Yang y Paulson, 2000). La adición de plastificantes en la producción de películas las vuelve menos quebradizas ya que durante el proceso de plastificación, la destrucción de los puentes de hidrógeno entre las moléculas del almidón ocurre simultáneamente con la formación de puentes de hidrógeno entre el plastificante y las moléculas de almidón (Yang *et al.*, 2006). Este mecanismo hace que las fuerzas intermoleculares entre las cadenas del polímero sean reducidas y aumente la movilidad de sus cadenas, mejorando su flexibilidad y extensibilidad (Habig-McHught y Krochta, 1994; Ke y Sun, 2001).

Un buen plastificante debe ser químicamente compatible con el polímero para permitir una mezcla estable y homogénea. El agua es un excelente plastificante, pero tiene algunas desventajas debido a que es difícil controlar su cantidad durante el proceso de transformación cuando se utiliza calor. Además, la naturaleza hidrofílica del almidón hace que la cantidad de la molécula de agua sea dependiente del medio ambiente. Es por eso que en la elaboración de películas de almidón comúnmente se utilizan otros plastificantes como alcoholes polhídricos o polioles como el glicerol, sorbitol y etilenglicol (Mali *et al.*, 2002; Laohakunjit y Noomhorm, 2004), siendo el primero el más utilizado. Se ha observado que es completamente miscible con el almidón y puede penetrar dentro de sus moléculas y reducir los enlaces de hidrógeno mejorando sus propiedades mecánicas. (Yu, 1998; Laohakunjit y Noomhorm, 2004). Además, también se ha observado que las películas son más homogéneas que con el sorbitol (Laohakunjit y Noomhorm, 2004).

Propiedades de las Películas de Almidón

La evaluación de propiedades en las películas de almidón como la solubilidad, transmisión de oxígeno, propiedades mecánicas como fuerza de tensión, elongación y módulo de elasticidad (o módulo de Young), análisis de superficie y comportamiento térmico, son importantes para determinar sus usos y aplicaciones. Todas estas

propiedades son asociadas a la fuente, tamaño y forma del almidón que se ha utilizado, así como a la adición de plastificantes u otros polímeros.

Solubilidad y absorción de agua

Debido a sus propiedades hidrofílicas, las películas elaboradas a partir de almidón no proveen una buena barrera para la humedad. Sin embargo, estas películas poseen buenas propiedades de barrera al oxígeno, dióxido de carbono y lípidos (Laohakunjit y Noomhorn, 2004).

Además de los factores ambientales, la solubilidad de las películas de almidón también está influenciada tanto por su composición química, como por compuestos añadidos durante su elaboración. Cuando se agregan plastificantes a las películas como el glicerol, la absorción de agua es dependiente de la humedad relativa de equilibrio (HRE) y del contenido del mismo (Godbillot *et al.*, 2006). Investigaciones previas han mostrado que a una mayor HRE al 44% la absorción de agua en la película incrementa proporcionalmente con el contenido de glicerol (Laohakunjit y Noomhorn, 2004; Godbillot *et al.*, 2006). Por otro lado, Mehyar y Han (2004) encontraron que las películas de almidón con mayor contenido de amilosa presentan menor solubilidad.

Propiedades mecánicas

Una de las características más importantes de las biopelículas en general, son aquellas relacionadas con su uso final. En este sentido, el estudio de las propiedades mecánicas es una de las más interesantes ya que son una consecuencia directa tanto de su composición como de la estructura molecular.

A través de los años se han desarrollado numerosos métodos para determinar las propiedades mecánicas de las películas, en particular su fuerza. Dichas propiedades pueden ser obtenidas a partir de ensayos como los de tensión, compresión, flexión,

elongación, dureza, entre otros; todos estos ensayos, se basan en la medición de esfuerzos aplicados y las deformaciones resultantes.

Esfuerzo y deformación. El esfuerzo es una consecuencia de las fuerzas que se producen en un cuerpo por la aplicación fuerzas externas y se obtiene dividiendo la fuerza aplicada por el área de la sección resistente:

$$\sigma = F / A \quad (1)$$

Donde σ es el esfuerzo ($\text{N/m}^2=\text{MPa}$), F es la fuerza aplicada (N) y A es el área sobre la cual actúa la carga (m^2). Por otro lado, el cambio de longitud que sufre un objeto bajo un esfuerzo se conoce como deformación (elongación) siendo dependiente del tipo de material. La deformación se obtiene de la siguiente manera:

$$\varepsilon = \Delta L / L_o \quad (2)$$

Donde ε es la deformación relativa, ΔL el cambio en la longitud y L_o la longitud original de la muestra (Rayas *et al.*, 2003).

Módulo de Young o módulo de elasticidad. La elasticidad es la propiedad que hace que un objeto que ha sido deformado, regrese a su forma original después de que se han removido las fuerzas deformadoras. De acuerdo a esta definición casi todos los materiales son elásticos (hasta cierto límite de carga). Robert Hooke estableció que el esfuerzo es proporcional a la deformación ($\sigma \propto \varepsilon$).

A partir de la ley de Hooke, en el siglo XIV Thomas Young calculó una constante de proporcionalidad (E) que relaciona el esfuerzo (σ) y la deformación uniaxial (ε) (mientras el material no exceda de su límite elástico):

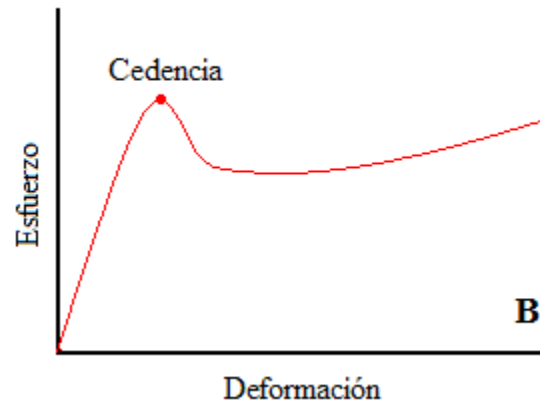
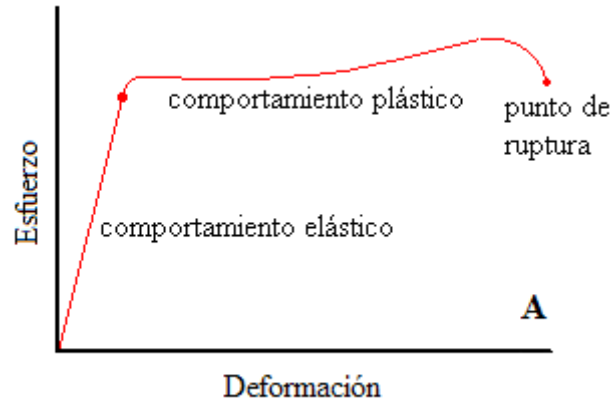
$$E = \sigma / \varepsilon \quad (3)$$

Esta constante está relacionada con la pendiente de la curva esfuerzo-deformación resultante en un ensayo de tensión, donde los esfuerzos se representan en el eje de las ordenadas y la deformación en el de las abscisas (Askeland, 1998; Rayas *et al.*, 2003). Aunque da la impresión de ser una medida de las propiedades elásticas de los materiales, el módulo de Young es una medida de su rigidez; entre mayor es el valor de esta constante, mayor es la rigidez del material (Askeland, 1998; Rayas *et al.*, 2003).

El módulo de Young está determinado por la estructura molecular del material. Una pendiente muy acentuada o abrupta indica que se requieren grandes fuerzas para separar los átomos y hacer que el material se deforme elásticamente. Por lo tanto, el material tiene un módulo de elasticidad alto (Encarta, 2007).

Lo anterior se puede explicar en función de que la distancia entre las moléculas de un material no sometido a esfuerzo depende de un equilibrio entre las fuerzas moleculares de atracción y repulsión. Cuando se aplica una fuerza externa que crea una tensión en el interior del material, las distancias moleculares cambian y el material se deforma. Si las moléculas están firmemente unidas entre sí, la deformación no será muy grande incluso con un esfuerzo elevado. En cambio, si las moléculas están poco unidas, una tensión relativamente pequeña causará una deformación grande. Por debajo del límite de elasticidad, cuando se deja de aplicar la fuerza, las moléculas vuelven a su posición de equilibrio y el material elástico recupera su forma original. Más allá del límite de elasticidad, la fuerza aplicada separa tanto las moléculas que no pueden volver a su posición de partida, y el material queda permanentemente deformado o se rompe (Encarta, 2007).

Curva esfuerzo-deformación. Representando el esfuerzo en función de la deformación unitaria se pueden obtener curvas semejantes a las que se muestran en las Figs. 6A y 6B. Durante la primera parte de la curva, el esfuerzo es proporcional a la deformación unitaria (región elástica que sigue la ley de Hooke). Cuando se disminuye el esfuerzo, el material vuelve a su longitud inicial. La línea recta termina en un punto denominado límite elástico. Si se continúa incrementando el esfuerzo, la deformación



Figs. 6. Curva típica de esfuerzo-deformación (A) y curva con punto de cedencia típica de polímeros semicristalinos (B).
Fuente: Cuadrado y Abraham, 1997.

unitaria aumenta rápidamente, pero al reducir el esfuerzo, el material no recobra su longitud inicial. La longitud es ahora mayor que la inicial L_0 , por lo que el material ha adquirido una deformación permanente. El material se deforma hasta un máximo, denominado punto de ruptura. Entre el límite de la deformación elástica y el punto de ruptura tiene lugar la deformación plástica. Si entre el límite de la región elástica y el punto de ruptura tiene lugar una gran deformación plástica el material se denomina dúctil. Sin embargo, si la ruptura ocurre poco después del límite elástico el material se denomina frágil (Smith, 1993; Cuadrado y Abraham, 1997).

En polímeros semicristalinos, como el polietileno, se observan curvas con un punto de fluencia (Fig. 6B). Los puntos de cedencia en los ensayos de tensión se asocian siempre con un mecanismo de deformación que absorbe energía. En el caso de polímeros semicristalinos, este mecanismo involucra la orientación y destrucción de morfologías semicristalinas. Al final de la curva se observa que para seguir deformando el material hay que aplicar un esfuerzo algo mayor, debido a que el material puede experimentar un reordenamiento de su estructura, dando por resultado una acción de refuerzo (Smith, 1993; Cuadrado y Abraham, 1997).

Por otro lado, publicaciones acerca de las propiedades mecánicas de las películas de almidón mencionan que para películas plastificadas con glicerol, el esfuerzo de tensión disminuye con el incremento del contenido de plastificante, mientras que la elongación aumenta (Mali *et al.*, 2006). Además, el esfuerzo de tensión incrementa con el contenido de amilosa, mientras que la elongación disminuye.

En cuanto a la relación de las propiedades mecánicas con el tamaño del gránulo de almidón, Lim *et al.* (1992) reportan una correlación lineal entre el grosor de las películas y el tamaño de partícula, y una correlación lineal inversa entre el esfuerzo de tensión y el tamaño de partícula.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materia Prima

Para el presente estudio se utilizó la variedad de trigo cristalino Júpare, cultivada en la región de Sonora durante el ciclo agrícola otoño-invierno 2005-2006.

Extracción y Purificación del Almidón

En la Fig. 7 se muestra un esquema general de la metodología para la extracción del almidón, elaboración de las películas y su evaluación. La extracción y purificación del almidón se realizó por el método de Vansteelandt y Delcour (1999). Se colocaron 100 g de trigo en una solución de bisulfito de sodio (0.24%) durante 36 h a 30 °C. Después, el grano fue macerado manualmente en un mortero y se mezcló con agua destilada. La mezcla fue pasada por una serie de tamices (mallas No. 325 y 230 U.S.A. equivalentes a 45 y 63 μm , respectivamente) y fue enjuagada varias veces con agua destilada. Luego se centrifugó a 1800 x g durante 20 min, se decantó y fueron desechadas las capas color amarillo-café formadas en la superficie. La centrifugación se repitió tres veces o hasta que la capa amarilla no fuera visible, obteniéndose finalmente el almidón completo.

Para la purificación (eliminación de los lípidos), el almidón fue suspendido en una solución de metanol al 80%, y se agitó durante dos horas. Posteriormente, la mezcla fue filtrada y lavada tres veces con el solvente, y se dejó secar a temperatura ambiente durante 24 horas. Por último, el almidón se guardó en frascos de polietileno para evitar la humedad del ambiente.

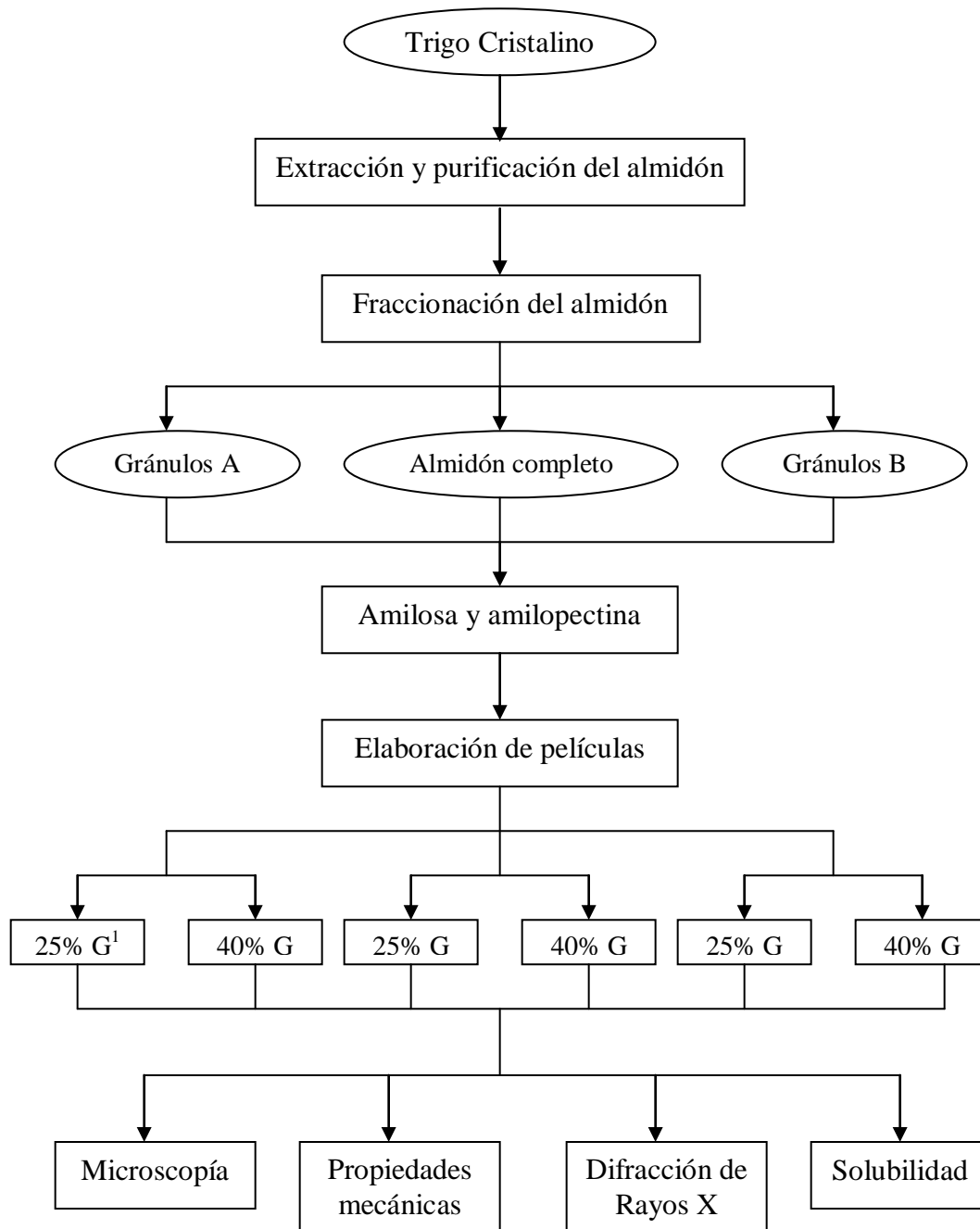


Fig. 7. Esquema para la extracción del almidón, elaboración de las películas y su evaluación. ¹G, glicerol.

Fraccionación del Almidón

Con el fin de obtener los gránulos de almidón A y B, se llevó a cabo la fraccionación basándose en el método de Peng *et al.* (1999) con modificaciones (Fig. 8). Se agregaron 5 mL de una suspensión de almidón (0.1 g/mL) a 10 mL de una solución de sacarosa al 80% (p/v) seguido de centrifugación (centrifuga marca Clay Adams Brand DYNAC modelo 420101) a 10 x g durante 10 min. El sobrenadante I (gránulos B) fue removido y pasado a otro tubo. El sedimento I (mezcla de gránulos A y B), fue suspendido en 10 mL de la solución de sacarosa al 80% (p/v) y se centrifugó a 10 x g durante 10 minutos. El sobrenadante II (gránulos B) se removió y fue pasado a otro tubo. El sedimento II (mezcla gránulos A y B) se resuspendió en sacarosa al 80% y fue centrifugado a 10 x g durante 10 minutos. El sobrenadante III fue considerado como mezcla de gránulo A y B por lo que se descartó. El sedimento III se consideró como gránulos A. Los sobrenadantes I y II fueron considerados GB y para su sedimentación fueron centrifugados a 60 x g durante 20 minutos. En el método original se realizaron cuatro ciclos de centrifugación donde todos los sedimentos fueron considerados GA, y los sobrenadantes GB, la velocidad de centrifugación para la sedimentación de los GB fue de 3500 x g durante 5 minutos.

Tanto los gránulos A como los B se enjuagaron con agua deionizada y metanol (80%), dejándose secar al aire. Por último el almidón fue almacenado en frascos de polietileno para evitar la humedad del ambiente.

Contenido de Amilosa

Se determinó el contenido de amilosa en el almidón completo (AC), gránulos A (GA) y gránulos B (GB), utilizando el método colorimétrico sugerido por Morrison y Laighnelet (1983), modificado por Paredes-López *et al.* (1989) con la adición de urea. En un tubo con tapón de rosca se pesaron 100 ± 0.1 mg de almidón previamente

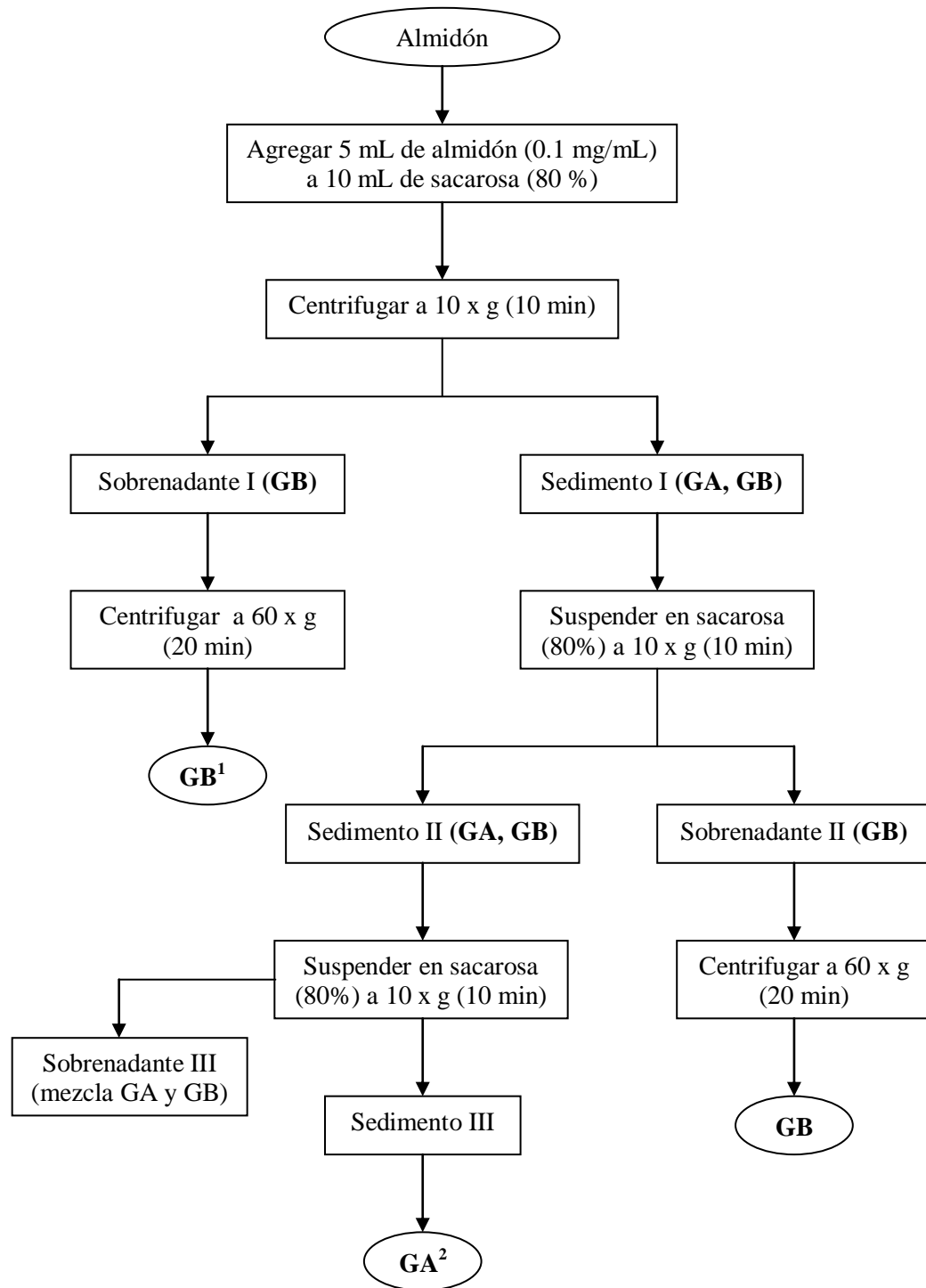


Fig. 8. Diagrama de flujo de la fraccionación del almidón para la obtención de los gránulos A y gránulos B. ¹GA, gránulos grandes; ²GB, gránulos pequeños.

desgrasado. Se agregaron 10 mL de una solución urea-dimetilsulfóxido (UDMSO), preparada con 9 volúmenes de dimetilsulfóxido y 1 volumen de urea 6 M, y se agitó vigorosamente en un homogenizador vórtex. Después el tubo fue colocado en un baño con agua a ebullición durante 10 min, con agitación intermitente, hasta observarse una solución clara. De ahí el tubo fue transferido a una estufa a 100° C por 80 min. El tubo se enfrió y se verificó la ausencia del gel.

Por otro lado, en un matraz volumétrico de 100 mL fue colocado 1 mL de la solución almidón-UDMSO, se añadieron 2 mL de solución I₂-KI (2 mg + 20 mg KI/mL) agitándose inmediatamente. Posteriormente el volumen se aforó a 100 mL y se leyó en un espectrofotómetro (marca Varian, modelo Cary-50 UV-VIS) a 635 nm 15 min después de la adición del reactivo I₂-KI. Para calcular el contenido de amilosa en el almidón se utilizó una curva estándar de mezclas de amilosa-amilopectina en proporciones 20:80, 30:70 y 40:60 (g:g), respectivamente.

Elaboración de las Películas

Las biopelículas de AC, GA y GB se obtuvieron por el método de evaporación de solventes o casting (Chung y Lai, 2005). Este método se basa en el calentamiento del almidón en exceso de agua, causando el hinchamiento irreversible de los gránulos. Este proceso viene acompañado de la pérdida de la estructura cristalina nativa y de la solubilización de la amilosa; fenómeno conocido como gelatinización (Thiré y Andrade, 2005). Se preparó una suspensión de almidón-agua (3% p/p) y se calentó en un baño de agua (marca Yamato, modelo BT-25) durante 1 h a 80° C. Una vez disuelto el almidón, la suspensión se colocó en una olla de presión (marca Ecko) a 121° C durante 20 min. Después de gelatinizar el almidón, se agregó glicerol como plastificante a concentraciones de 25 y 40%. Inmediatamente la mezcla fue homogenizada por agitación durante 10 min en una placa de calentamiento-agitación (marca Nuova-Thermolyne). En seguida, 6 g de la suspensión fueron vertidos en

cajas Petri (60 mm de diámetro) y se dejaron secar a 60° C durante 8 h. Por último, las películas fueron colocadas durante 72 horas en desecadores que contenían una solución saturada de bromuro de sodio para lograr el equilibrio a una humedad relativa del 57%.

Determinaciones Analíticas

Microscopía electrónica de barrido

La microscopía de las películas se llevó a cabo con la finalidad de observar la superficie, así como la incorporación del plastificante. Para esto se utilizó un microscopio electrónico de barrido (marca Jeol, modelo 5410LV), equipado con un detector para electrones secundarios y retrodispersos. Previo al análisis las películas fueron recubiertas con una capa de oro en un recubridor de metales (marca JFC-1206E). Todas las muestras fueron examinadas a 2000 aumentos utilizando una aceleración de voltaje de 15 kV.

Propiedades mecánicas de esfuerzo-deformación

Las propiedades mecánicas evaluadas en las películas fueron el esfuerzo de tensión, la elongación y el módulo de elasticidad. Dichas propiedades fueron determinadas en una máquina universal de ensayos mecánicos (marca United, modelo SSTM-5KN), equipado con un extensómetro láser (modelo EXT-62-LOE). Las medidas del espécimen fueron de 4.5 cm de largo por 0.5 cm de ancho y se analizaron sometiéndose a una fuerza de tensión con una velocidad de cabezal de 1 mm/min. La celda de carga utilizada fue de 50 N de fuerza y la separación entre mordazas de 2 cm.

Difracción de rayos X

El patrón de cristalinidad se obtuvo con un difractómetro de rayos X de polvos (modelo Rigaku Geiger-flex D/Max-B) equipado con radiación de cobre y monocromador de grafito. Las muestras fueron analizadas en el rango de 5-70° en la escala 2θ con intervalos de 0.02°, utilizando 40 kV y 20 mA.

Solubilidad

La solubilidad de la película se determinó con el fin de establecer bajo que condiciones de humedad pueden ser utilizadas. Se siguió el método de Laohakunjit y Noomhorn (2004) con modificaciones. La modificación consistió en colocar 60 mg de la película en 6 mL de agua deionizada, en vez de 1 g en 10 mL de agua. En seguida se agitó durante 30 minutos (agitador marca Stovall, modelo BDRAA115S) y se centrifugó a 3000 rpm por 15 minutos (centrifuga marca Clay Adams Brand DYNAC, modelo 420101). A continuación, el sobrenadante fue separado, y se dejó secar durante 8 horas a 80°C. Finalmente el porcentaje de solubilidad fue calculado por diferencia de peso siguiendo la fórmula:

$$\text{Solubilidad (\%)} = \frac{\text{Peso inicial de materia seca} - \text{Peso de materia seca solubilizada}}{\text{Peso inicial de la materia seca}} \times 100 \quad (4)$$

Para obtener el valor del peso inicial de la materia seca, al almidón se le determinó el contenido de humedad por el método 44-15A de la AACCC.

Diseño de Experimentos y Análisis Estadístico

Se utilizó un diseño factorial de dos factores: concentración de glicerol (25 y 40%) y tamaño de gránulo (almidón completo, gránulos grandes y gránulos pequeños). Las variables dependientes que se evaluaron fueron: porcentaje de solubilidad, esfuerzo de tensión, elongación en porcentaje y módulo de elasticidad de las películas. Además se realizó una regresión lineal por partes considerando el efecto del contenido de amilosa en el gránulo, el porcentaje de glicerol y la humedad en las películas sobre las propiedades mecánicas y la solubilidad.

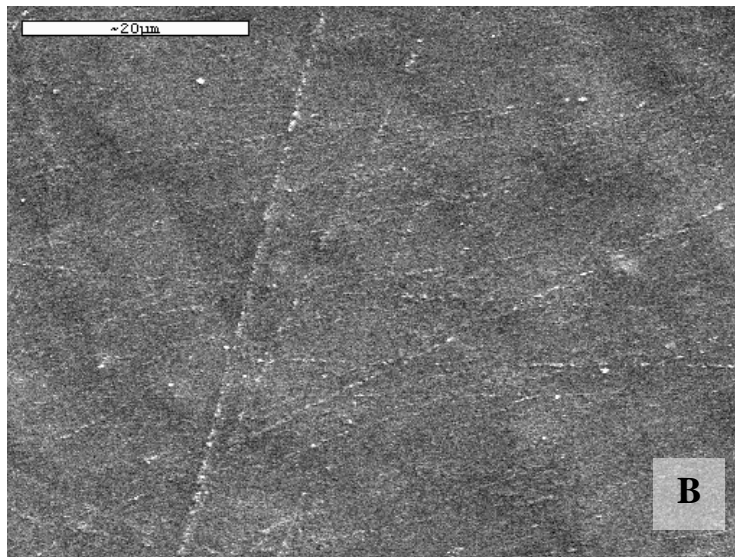
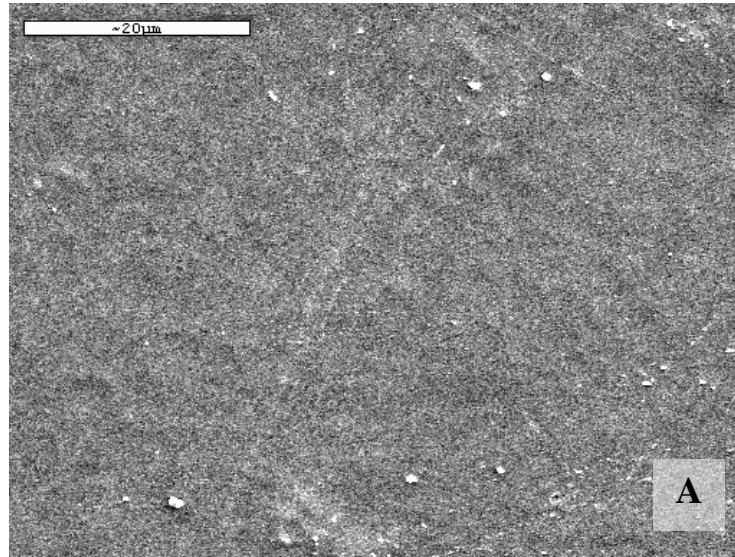
Los datos se analizaron efectuando un análisis de varianza a un nivel de significancia de 0.05. Se utilizó el programa XL-STAT-Pro versión 7.0 (2003 Addinsoft) para Windows.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

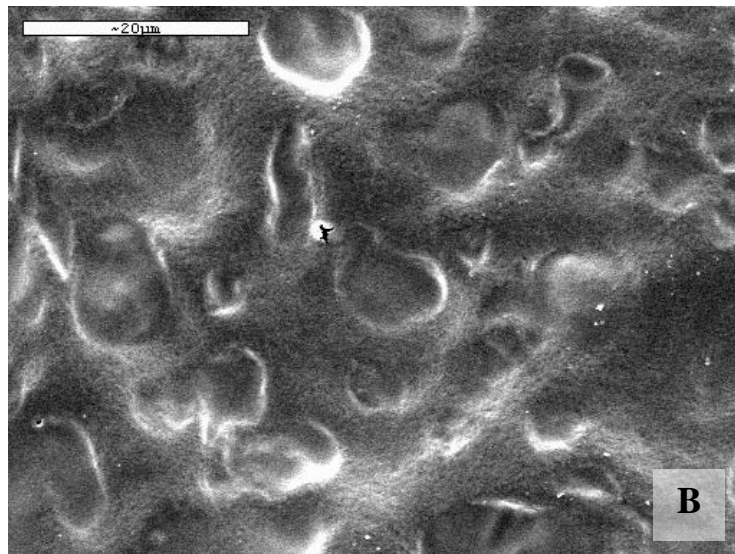
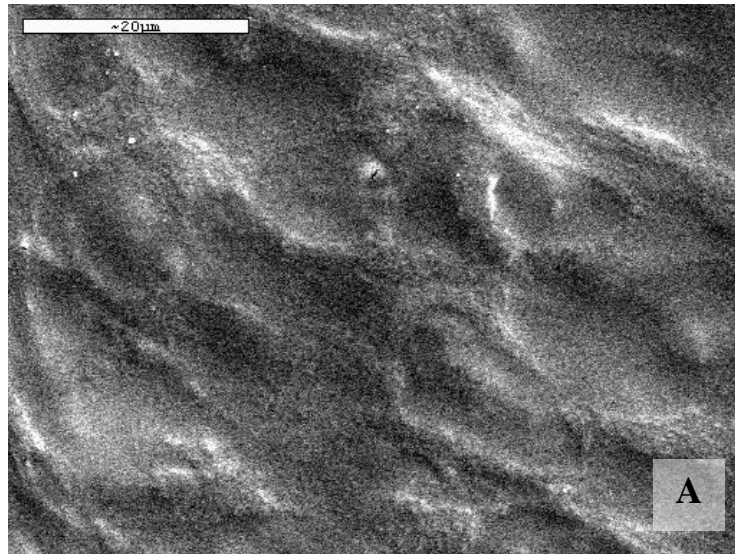
Microscopía y Características Físicas

Todas las películas elaboradas resultaron a simple vista transparentes, y homogéneas. Las películas con 40% de glicerol (G) fueron ligeramente más opacas que las de 25% G. El grosor de las películas varió en función de la concentración de glicerol, siendo ligeramente más gruesas las películas con mayor porcentaje de glicerol (40% G: 0.09 ± 0.003 mm; 25% G: 0.08 ± 0.003 mm). El contenido de humedad en las películas fue alrededor de 7.76% para las plastificadas con 25% G, mientras que para las del 40% G fue de 12.8%.

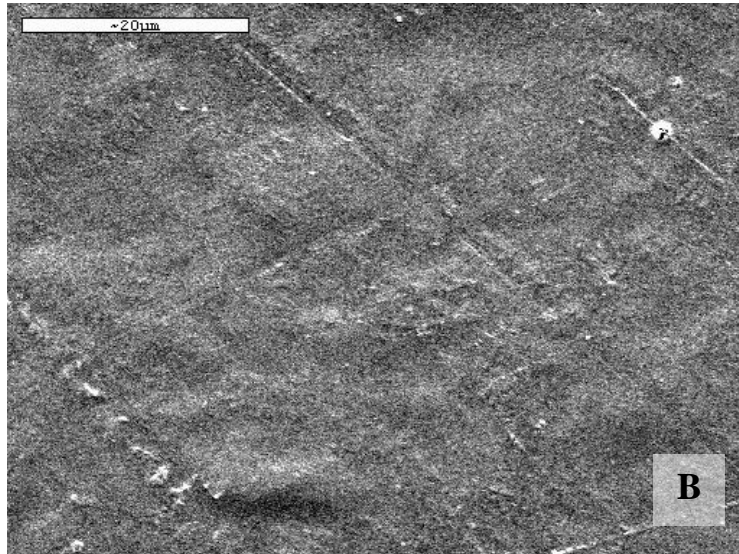
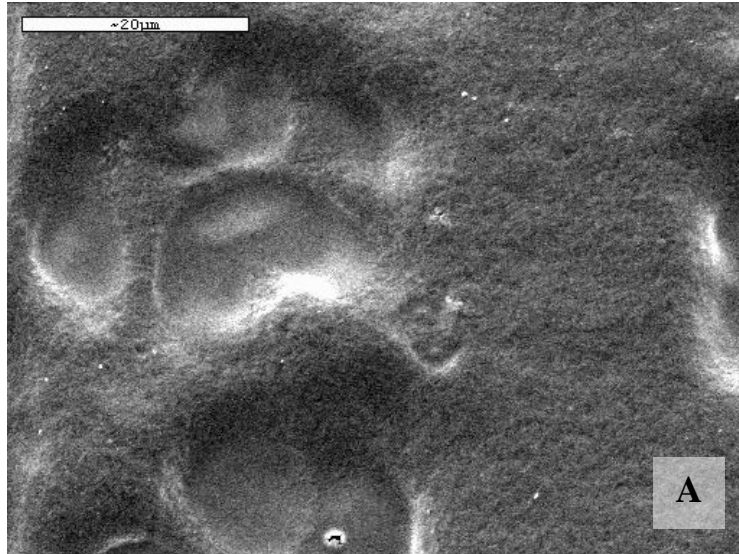
De acuerdo al mecanismo de gelatinización, durante tratamiento térmico el gránulo de almidón se hincha y rompe, dejando que las moléculas de amilosa y amilopectina se dispersen en la solución. Cuando esta solución gelatinizada se enfría, los polímeros del almidón y los fragmentos granulares comienzan a reasociarse en una estructura ordenada a través de puentes de hidrógeno, dándose la formación de la película. En las micrografías de las películas elaboradas con el almidón completo (AC) (Figs. 9A y 9B) se observa una fase homogénea. Esto significa que hubo una completa solubilización de los polímeros de almidón, así como una completa incorporación del plastificante en la película. Sin embargo, en las películas de los gránulos grandes (GA) con 25 y 40% G (Figs. 10A y 10B), así como en la película de los gránulos pequeños (GB) con 40% G (Fig. 11A), se observaron gránulos hinchados y sus remanentes granulares. Estos remanentes granulares son llamados gránulos “fantasmas” y son estructuras que retienen características particulares de los gránulos de almidón nativo, a pesar de haber perdido parte del contenido del gránulo (Debet y Gidley, 2007). De acuerdo con Zobel (1984), en algunos de los métodos utilizados comúnmente para producir las películas, las condiciones no son suficientes para la completa solubilización de los polímeros del almidón; lo que puede indicar que solo una parte del almidón fue solubilizado completamente. Por otra parte, la película elaborada a partir



Figs. 9. Micrografías de las películas de almidón completo (2000 X) con 40% glicerol (A) y 25% glicerol (B).



Figs. 10. Micrografías de las películas de los gránulos grandes (2000 X) con 40% glicerol (A) y 25% glicerol (B).



Figs. 11. Micrografías de las películas de los gránulos pequeños (2000 X) con 40% glicerol (A) y 25% glicerol (B).

de los GB con 25% G, mostró al igual que las películas del AC, una fase homogénea, lo que puede significar que la formación de la película se ve afectada tanto por las propiedades de cocinado de los gránulo tipo A y B como por la concentración de plastificante utilizado.

En la deshidratación de la solución del almidón para formar la película, gran número de gránulos gelatinizados y sus remanentes se agregan al azar para componer la película. De acuerdo a Liu y Han (2005), en ausencia de plastificante, la amilosa y la amilopectina forman una película con una estructura bifásica. La red de los cúmulos de amilosa se encuentra embebida en la red de fondo de la amilopectina (Liu y Han, 2005). Las interacciones entre las moléculas de amilosa y amilopectina contribuyen a la formación de la película, pero al utilizarse almidón puro, las interacciones son de tal magnitud que la película se vuelve rígida y quebradiza. La existencia de cantidades suficientes de plastificantes en las películas de almidón, reduce los enlaces intermoleculares e intramoleculares entre las moléculas de la amilosa y la amilopectina haciendo la película flexible (Yang *et al.*, 2006). Por esta razón, la aplicación de un plastificante como el glicerol en las películas, el cual es químicamente compatible con el almidón, hace que no aparezca separación de fases, a excepción de gránulos hinchados y sus remanentes.

En las películas de GA con 25 y 40% glicerol (Figs. 11A y 11B), se aprecia una leve rugosidad en la superficie. Según Rindlav-Westling y Gatenholm (2003), las películas hechas de amilopectina de almidón de maíz resultaron totalmente amorfas sin ninguna estructura visible, lo que se refleja en una superficie suave y lisa. Por otro lado, las películas de amilosa fueron semicristalinas y se cree que la estructura cristalina subyacente le da a la película cierto aspecto de rugosidad. En nuestro estudio no se encontraron diferencias significativas entre el contenido de amilosa en los distintos tipos de gránulos (Tabla 1) por lo que la rugosidad de las películas no puede ser explicada en base al contenido de amilosa. Por otra parte, considerando la estructura

Tabla 1. Contenido de amilosa en los diferentes tipos de gránulos de almidón.

Tipo de Gránulo	Contenido de Amilosa (%)
Almidón Completo	26.55 ± 0.53^1
Gránulos A	27.46 ± 0.65
Gránulos B	26.79 ± 0.91

¹Desviación estándar

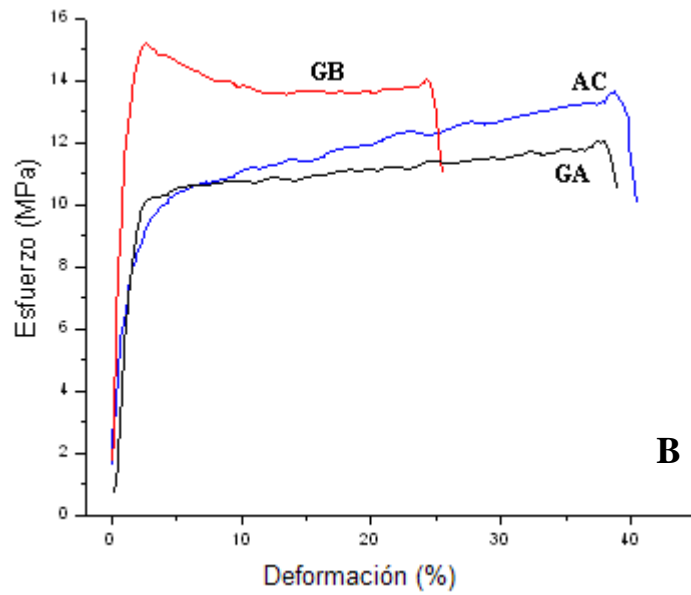
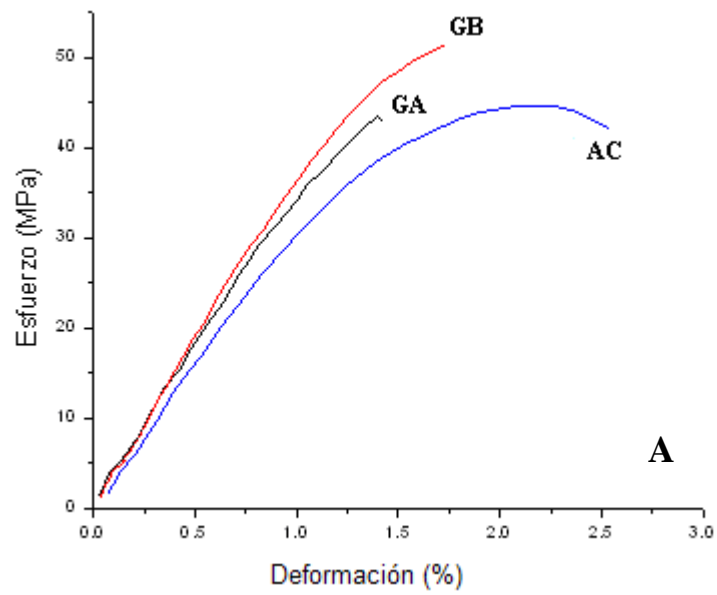
supramolecular de los gránulos grandes de almidón (lenticulares) y la forma que toman durante el proceso de gelatinización, se puede decir que parte de la rugosidad de las películas podría deberse a dicho fenómeno.

Propiedades Mecánicas de Esfuerzo-Deformación

La Fig. 12 muestra las curvas típicas de esfuerzo-deformación de las películas del almidón completo (AC), gránulos grandes (GA) y gránulos pequeños (GB), con 25% y 40% de glicerol (G). De estas gráficas se determinaron respectivamente los valores del esfuerzo de tensión (ET), porcentaje de elongación (E) y módulo de Young (ME) (Tabla A-1, Figs. A-1, A-2 A-3, Anexo I; gráficas y datos completos).

Las películas donde se utilizó 25% G, sin importar el tipo de gránulo, presentaron un comportamiento similar al de un material quebradizo. Éstos se caracterizan por ser resistentes, exhibiendo valores altos de esfuerzo de tensión y módulo de Young, pero poseen baja deformación antes de la ruptura. Por otro lado, todas las películas con 40% G exhibieron curvas del comportamiento de un material dúctil, que se caracteriza por una deformación alta y esfuerzo de tensión y módulo de Young bajos (Mali *et al.*, 2005; García *et al.*, 2006).

Un aumento de glicerol en la película (de 25 a 40%) disminuyó el ET de 42-50 a 11-17 MPa y el ME de 31-34 a 4-11 MPa, mientras incrementó la elongación de 1.4-2.7 a 24-41%. Estos resultados indican que la ductilidad del material incrementa y como es de esperarse sucede un efecto de plastificación al introducir glicerol a la composición de la película. Este efecto de plastificación ya ha sido observado en materiales hechos de almidón (Mali *et al.*, 2006). La introducción del plastificante reduce interacciones directas entre los polímeros del almidón, por lo que bajo fuerzas de tensión, se facilitan los movimientos de sus cadenas (García *et al.*, 1999; Mali *et al.*, 2002).



Figs. 12. Curvas típicas de esfuerzo-deformación de las películas con 25% (A) y 40% glicerol (B). (AC) almidón completo, (GA) gránulos grandes, (GB) gránulos pequeños.

En la Tabla 2 se muestra el análisis de varianza del efecto del tipo de gránulo y concentración de glicerol sobre el ET, E y ME de las películas. Se observa que el tipo de gránulo no tuvo un efecto significativo ($p < 0.05$) sobre el esfuerzo de tensión, comportamiento también se distingue en la Fig. 13, donde se ve la clara disminución del ET en función del contenido de glicerol, sin importar el tipo de gránulo utilizado.

En la misma Tabla se muestra el efecto significativo que tuvieron el tipo del gránulo y el contenido de glicerol, sobre el porcentaje de elongación de las películas ($p < 0.05$). Esto se observa en la Fig. 14, donde la elongación incrementa significativamente al aumentar el contenido de glicerol. Aparentemente el tipo de gránulo tuvo un mayor efecto en la E de las películas, sobre todo cuando se utilizaron mayores cantidades de plastificante. Dicho efecto se hizo más notorio en las películas de los gránulos pequeños, resultando con la menor E (38.87%). El módulo de elasticidad de las películas (Fig. 15), así como el esfuerzo de tensión, fueron inversamente proporcionales a la cantidad de glicerol utilizado y al igual que en la elongación, el tipo de gránulo afectó el porcentaje de éste, especialmente en las películas de los GB, presentando el mayor ME (11.3 MPa).

Algunas investigaciones muestran que el contenido de amilosa es relevante en la capacidad de formación de las películas de almidón, y que tiene gran efecto en sus propiedades mecánicas. Por su naturaleza lineal, las moléculas de amilosa forman películas más fuertes y flexibles (Zobel, 1988; Zhang y Han, 2006). Además del contenido de amilosa, el plastificante también juega un papel importante en las propiedades de las películas; reduce las interacciones intermoleculares de las cadenas del polímero, además de que es capaz de atrapar moléculas de agua mejorando la flexibilidad de la película (Zhang y Han, 2006; Zamudio-Flores *et al.*, 2006). Tomando en cuenta esto, se realizó una regresión lineal por partes considerando el contenido de amilosa en los gránulos; el porcentaje de glicerol y el contenido de humedad en relación a las propiedades mecánicas de las películas. Sin embargo, se vio que al hacer la correlación para incluir las variables independientes en el modelo, se encontró que el

Tabla 2. Análisis de varianza, valor de F, del efecto del tipo de gránulo y concentración de glicerol sobre el esfuerzo de tensión, elongación y módulo de elasticidad de las películas.

Propiedad Mecánica	Fuente de Variación	GL ¹	CM ¹	Valor-F
Esfuerzo de Tensión	TG ¹	2	131.42	3.37 NS
	CG ¹	1	8024.58	411.30 **
	TG*CG	2	59.77	1.53 NS
Elongación	TG	2	189.09	20.22 **
	CG	1	8265.80	883.86 **
	TG*CG	2	170.28	18.21 **
Módulo de Elasticidad	TG	2	49.61	17.46 **
	CG	1	5102.55	1795.55 **
	TG*CG	2	22.64	7.97 **

¹GL, grados de libertad; CM, cuadrado de la media; TG, Tipo de gránulos; CG, concentración de glicerol.

NS = no significativo a un nivel de P = 0.05 (p > 0.05).

** = muy significativo a un nivel de P = 0.01 (p < 0.01).

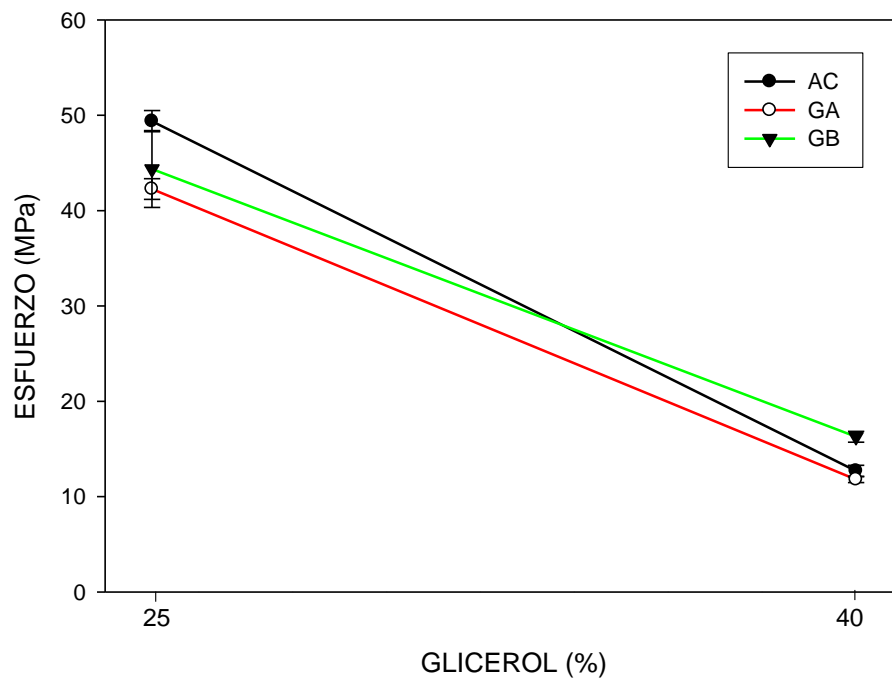


Fig. 13. Efecto del tipo del gránulo y de la concentración de glicerol sobre el esfuerzo de tensión de las películas. Las barras indican el error estándar de la media.

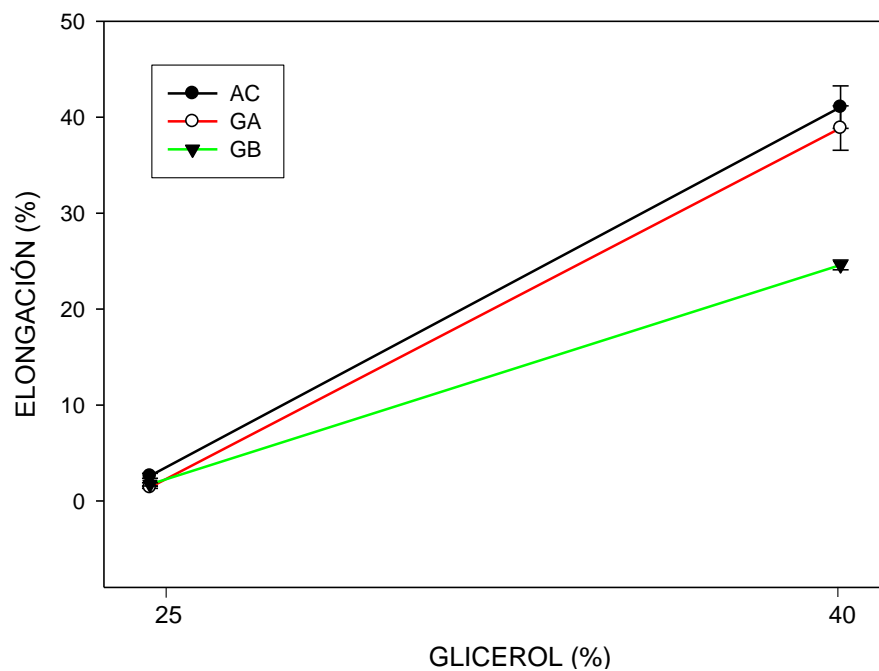


Fig. 14. Efecto del tipo del gránulo y de la concentración de glicerol sobre la elongación de las películas. Las barras indican el error estándar de la media.

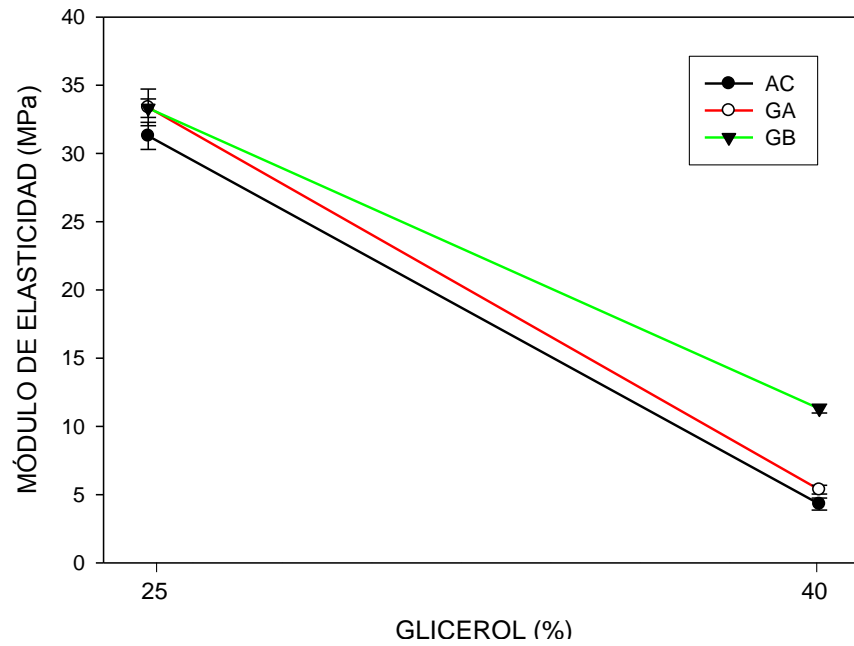


Fig. 15. Efecto del tipo del gránulo y de la concentración de glicerol sobre el módulo de elasticidad de las películas. Las barras indican el error estándar de la media.

contenido de glicerol y de humedad en las películas fueron variables redundantes, ya que presentaron un coeficiente de correlación alto y muy significativo entre ellas (AC: 0.95; GA: 0.99; GB: 0.71), por lo que solamente se consideraron el contenido de glicerol y de amilosa.

En la Tabla 3 se muestran los valores de t del efecto del contenido de amilosa y el porcentaje de glicerol sobre el esfuerzo de tensión, elongación y módulo de elasticidad de las películas. Se puede observar que las propiedades mecánicas pueden ser explicadas en función del porcentaje de glicerol más que por la cantidad de amilosa; ya que este últimos no presentó efecto significativo (Tabla 3) ($p < 0.05$). En la Tabla 4 se muestran los coeficientes de determinación de este análisis y se puede notar que a excepción de los gránulos pequeños ($R^2 = 0.855$), el contenido de glicerol puede explicar casi totalmente las propiedades mecánicas de las películas. Esto significa que existe otro factor importante en los gránulos pequeños (aparte del glicerol y el contenido de amilosa) que está teniendo un efecto notable en el esfuerzo de tensión.

Las características fisicoquímicas de los almidones gelatinizados pueden ser atribuidas a la combinación de sus polímeros solubilizados y a una estructura granular residual (gránulos “fantasmas”) (Miles *et al.*, 1985). De acuerdo a Debet y Gidley (2007), la formación de los “fantasmas”, es debida a las uniones de entrecruzamiento de las cadenas de los polímeros con los gránulos hinchados, involucrando la mayoría, la formación de dobles hélices.

Se cree que tanto la forma como la estructura molecular de los polímeros del almidón al igual que los “fantasmas” pueden tener algún tipo de influencia en las propiedades mecánicas de sus películas. Considerando la superestructura de los gránulos A y B del almidón de trigo, el desarrollo de los “fantasmas” se puede dar con diferente arreglo. Además, Fannon y Bemiller (1992) sugieren que también los gránulos remanentes pueden ser estructuralmente reforzados por uniones de entrecruzamiento, afectando la resistencia de los mismos. En este estudio se piensa que los valores más altos de ET y ME en los gránulos B podría explicarse en base a una acción de

Tabla 3. Valores de t del efecto del contenido de amilosa y el porcentaje de glicerol sobre el esfuerzo de tensión, elongación y módulo de elasticidad de las películas.

Propiedad Mecánica	Fuente de Variación	Tipo de gránulo		
		AC ¹	GA ¹	GB ¹
		Valor-t	Valor-t	Valor-t
Esfuerzo De Tensión	G ¹	30.16 **	29.21 **	6.42 **
	Amilosa	1.25 NS	0.74 NS	0.26 NS
Elongación	G	16.59 **	16.98 **	24.48 **
	Amilosa	0.62 NS	1.34 NS	0.95 NS
Módulo de Elasticidad	G	24.92 **	21.23 **	24.48 **
	Amilosa	0.94 NS	0.37 NS	0.95 NS

¹ AC, almidón completo; GA, gránulos grandes; GB, gránulos pequeños; G, glicerol. NS = no significativo a un nivel de P = 0.05 (p > 0.05).

** = muy significativo a un nivel de P = 0.01 (p < 0.01).

Tabla 4. Coeficientes de determinación (R^2) obtenidos de la regresión lineal por tipo de gránulo, considerando el contenido de amilosa y porcentaje de glicerol en las propiedades mecánicas de las películas.

Tipo de gránulo	Esfuerzo de Tensión	Elongación	Módulo de Elasticidad
Almidón Completo	0.992 **	0.975 **	0.989 **
Gránulos A	0.992 **	0.976 **	0.985 **
Gránulos B	0.855 **	0.988 **	0.990 **

** = Muy significativo a un nivel de $P = 0.01$ ($p < 0.01$).

reforzamiento que se da en los remanentes granulares. Esto concuerda con lo mostrado en la figura 12B, donde se observa para los gránulos B, el comportamiento de un polímero semicristalino, que involucra un reordenamiento de su estructura requiriendo un mayor esfuerzo para lograr la deformación. Ya que la formación de los “fantasmas” se debe a uniones de entrecruzamiento, a nivel molecular, estas uniones podrían ser mayores en comparación con las de los gránulos A, creando una especie de sistema de refuerzo que resulta en una mayor resistencia a la deformación en las películas. Esta hipótesis podría concordar con lo encontrado por Lim *et al.* (1992), que reportó una correlación lineal inversa entre el esfuerzo de tensión y el tamaño de los gránulos. Otra suposición, es que los “fantasmas” en las películas de los gránulos A podrían crear un efecto similar al de un plastificante; es decir, que la forma de los “fantasmas” en los gránulos A favorezca al incremento del volumen libre entre los polímeros del almidón y reduzcan las interacciones moleculares, disminuyendo el esfuerzo y su vez aumentando la deformación.

En general, la concentración de glicerol tuvo un gran efecto en las propiedades mecánicas de las películas evaluadas, al igual que el tipo de gránulo utilizado. Algunos estudios muestran que en películas plastificadas, no solo la amilosa, el plastificante o el tamaño de partícula tienen efecto en las propiedades mecánicas, sino que algunas de las características finales de las películas también están influenciadas por las interacciones entre la amilopectina y el plastificante (Mali *et al.*, 2004). Lo cual significa que las propiedades en la estructura, el grado de ramificación, el largo de las cadenas y el peso molecular de los polímeros en los gránulos de almidón, podrían también explicar algunas de las diferencias encontradas en las pruebas mecánicas.

Finalmente, con las pruebas mecánicas realizadas en esta investigación se logra entender que a partir de los gránulos de almidón de trigo cristalino (tipo-A y tipo-B) y utilizando glicerol como plastificante, se pueden obtener biopelículas con distintas propiedades y como consiguiente con diferentes aplicaciones. Como por ejemplo,

películas dúctiles resistentes a la deformación aunque poco extensibles (GB 40% G), película poco resistentes aunque extensibles (AC 40% G), y por otro lado, películas resistentes aunque con bajas deformaciones (AC, GA, y GB con 25% G).

Solubilidad

En la Tabla 5 se muestra el análisis de varianza del efecto del tipo de gránulo de almidón y la concentración de glicerol sobre la solubilidad de las películas. Se observa que tanto el tipo de gránulo como el porcentaje de glicerol presentaron un efecto muy significativo ($p < 0.05$); por otro lado, la interacción tipo de gránulo, porcentaje de glicerol, fue también significativa. En la Fig. 16 se muestra que el contenido de glicerol tuvo un efecto muy importante sobre la solubilidad; ya que aumentó drásticamente al incrementar el porcentaje de glicerol (G) en la película.

La solubilidad de las películas se encontró en el rango 0.2 a 1.2% para las películas plastificadas con 25% de G, mientras que para las películas con el 40% G fue de 7 a 14% (Tabla A-2, Anexo I; datos completos). Estos valores de solubilidad comparados con otros estudios resultaron ser sumamente bajos; ya que Laohahunjit y Noomhorm (2004) encontraron porcentajes de solubilidad cerca del 30 % en películas de almidón de arroz plastificadas con 35% de glicerol y alrededor del 22% en películas con 25 % de glicerol como plastificante. Además, Mehyar y Han (2004) encontraron porcentajes de solubilidad del 1.48 a 1.5 % en películas no plastificadas de arroz y chícharo.

De acuerdo a estudios anteriores, la adición de plastificantes, en particular el glicerol, tiene gran influencia en la solubilidad de las películas de almidón. Debido a su carácter hidrofílico, el glicerol interactúa fuertemente con el agua incorporándola fácilmente a la red de la película a través de puentes de hidrógeno (Laohahunjit y Noomhorm, 2004; Mehyar y Han, 2004; García *et al.*, 2006). Zhang y Han (2006) indican que cuando existe una menor cantidad de plastificante, durante la formación de la película, los polímeros del almidón interactúan directamente entre ellos. Esto resulta

Tabla 5. Análisis de varianza, valor de F, del efecto del tipo de gránulo y concentración de glicerol sobre la solubilidad de las películas.

Evaluación	Fuente de Variación	GL ¹	CM ¹	Valor-F
	TG	2	16.274	9.31**
Solubilidad	CG	1	447.192	255.91**
	TG*CG	2	18.731	10.72**

¹GL, grados de libertad; ²CM, cuadrado de la media; ³TG, Tipo de gránulos; ⁴CG, concentración de glicerol.

** = muy significativo a un nivel de P = 0.01 (p<0.01).

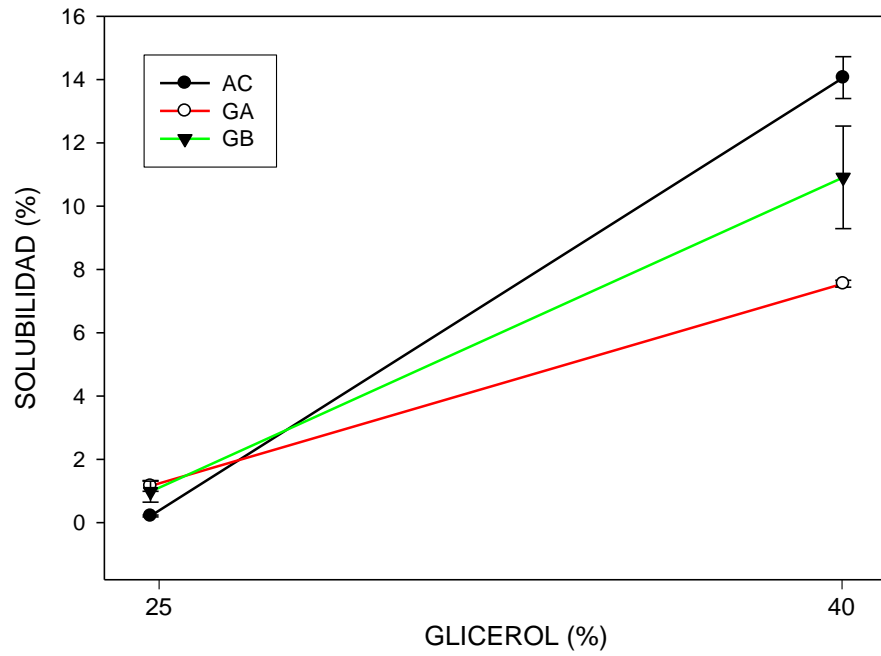


Fig. 16. Efecto del tipo de gránulo y de la concentración de glicerol sobre la solubilidad de las películas.

en un menor volumen libre en las estructuras de las películas, haciendo que disminuya la penetración del agua y como consecuencia la solubilización. Considerando lo anterior, se realizó una regresión lineal por partes tomando en cuenta el contenido de amilosa en los gránulos; el porcentaje de glicerol y el contenido de humedad en relación a la solubilidad de las películas. Por la misma razón que en las propiedades mecánicas, se excluyó el contenido de humedad de las películas del modelo y fueron únicamente consideradas las variables independientes porcentaje de glicerol y contenido de amilosa.

En la Tabla 6 se muestran los valores de t del efecto del contenido de amilosa y el porcentaje de glicerol sobre la solubilidad de las películas. Se observa que dicha propiedad es explicada en función del porcentaje de glicerol, ya que el contenido de amilosa no presentó efecto significativo ($p < 0.05$). En la Tabla 7 se muestran los coeficientes de determinación derivados de este análisis. Se observa que el contenido de glicerol empleado explica casi completamente la solubilidad de las películas.

Con respecto al efecto del tipo de gránulo sobre la solubilidad de las películas, se encontró que en las películas plastificadas con 40% de glicerol el efecto fue más marcado (Fig. 16); el almidón completo mostró la mayor solubilidad (14.06%), mientras que los gránulos grandes (GA) resultaron con menor solubilidad (7.5%). De acuerdo a Mehyar y Han (2004), estos resultados pueden deberse a que la red en los GA tienen mayores fuerzas interactuando con las moléculas del glicerol, lo cual hace que disminuya la incorporación de agua a la película. Por otro lado, al utilizarse 25% de glicerol las películas no mostraron diferencias significativas entre los distintos tipos de gránulos.

En general se puede decir que tanto la cantidad de plastificante empleado, como el tipo de gránulo, tuvieron efecto en la solubilidad de las películas de almidón de trigo. El hecho de que en las biopelículas evaluadas haya existido solubilidad refleja que la red de las películas es parcialmente soluble. Las películas con el 25% de glicerol

Tabla 6. Valores de t del efecto del contenido de amilosa y el porcentaje de glicerol sobre la solubilidad de las películas.

Evaluación	Fuente de Variación	Tipo de gránulo		
		AC ¹	GA ¹	GB ¹
		Valor-t	Valor-t	Valor-t
Solubilidad	G ¹	9.78 **	8.92 **	8.30 **
	Amilosa	0.54 NS	1.37 NS	1.93 NS

¹ AC, almidón completo; GA, gránulos grandes; GB, gránulos pequeños; G, glicerol.
NS = no significativo a un nivel de P = 0.05 (p > 0.05).

** = muy significativo a un nivel de P = 0.01 (p < 0.01).

Tabla 7. Coeficientes de determinación (R^2) obtenidos de la regresión lineal por tipo de gránulo, considerando el contenido de amilosa y porcentaje de glicerol en la solubilidad de las películas.

Tipo de gránulo	Solubilidad
Almidón Completo	0.998 **
Gránulos A	0.999 **
Gránulos B	0.962 **

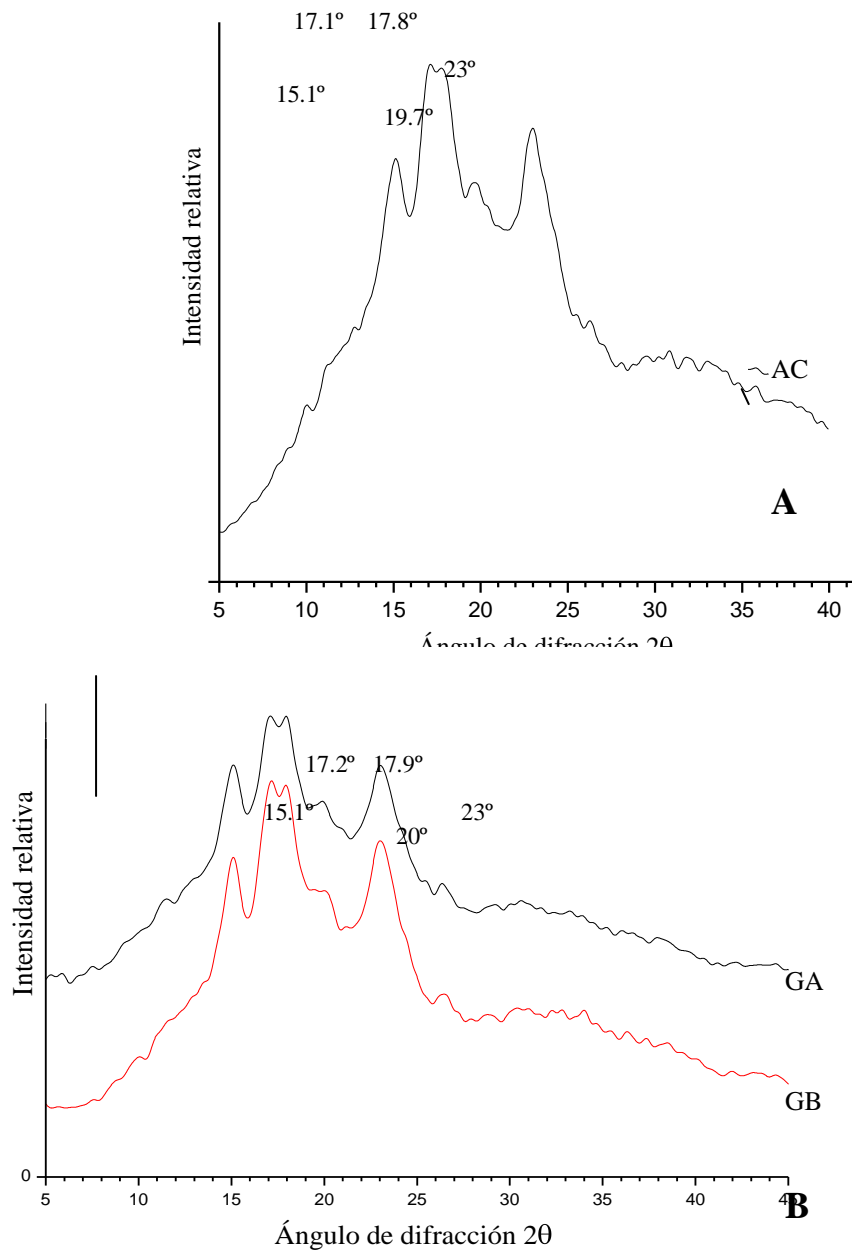
** = Muy significativo a un nivel de $P = 0.01$ ($p < 0.01$).

resultaron ser más resistentes a la solubilización que las del 40%, cumpliendo así uno de los requisitos de las biopelículas elaboradas a partir de almidón; la baja solubilidad durante el almacenamiento (Laohahunjit y Noomhorm, 2004).

Difracción de Rayos X

Los patrones de difracción de rayos X (DRX) del almidón nativo y de sus fracciones (GA y GB) se muestran en la Figs. 17A y 17B. Los picos de difracción aparecieron en posiciones cercanas a los 15.1°, 17.1°, 17.9°, 19.9° y 23°. Lo anterior indica que el almidón nativo de trigo cristalino, así como sus fracciones cumplen con la estructura cristalina tipo A. Esta caracterización general de los cereales ya ha sido observada en otros trabajos (Katz y Itallie, 1930; Rodríguez *et al.*, 2001; Saiah *et al.*, 2007).

En ciertos casos la DRX puede ser utilizada para detectar cambios en la cristalinidad del almidón causado por tratamientos físicos o químicos (Bello-Pérez, 2005). En este estudio, la cristalinidad tipo A que existía en el almidón nativo fue modificada (Figs. 18 y 19), concordando con Cooke y Gidley (1992), quienes observaron que la cristalinidad y el orden molecular del almidón se pierden durante la gelatinización. Esto se debe a que durante el procesamiento del almidón las moléculas del plastificante interactúan con las de almidón, reemplazando los puentes de hidrógeno intermoleculares, destruyendo la cristalinidad (Yang *et al.*, 2006). En las Figs. 18 y 19 se puede observar que las películas presentaron una estructura semicristalina con cuatro picos cercanos a los 9.8°, 17.2°, 19.9° y 21.6° típica de la cristalinidad tipo Vh. Este tipo de cristalinidad es atribuida a la formación de los complejos amilosa-lípidos, que son creados después de que el almidón ha sido gelatinizado (Thiré y Andrade, 2005). La transformación de la cristalinidad tipo A del almidón de trigo nativo en la tipo Vh encontrada en las películas, ya se ha observado anteriormente en películas elaboradas a partir de almidón de trigo y maíz (Thiré y Andrade, 2005; Yang *et al.*, 2006; Saiah *et al.*, 2007).



Figs. 17. Difractogramas de rayos X del almidón nativo de trigo cristalino. (A) Almidón completo; (B) GA, gránulos grandes y GB, gránulos pequeños.

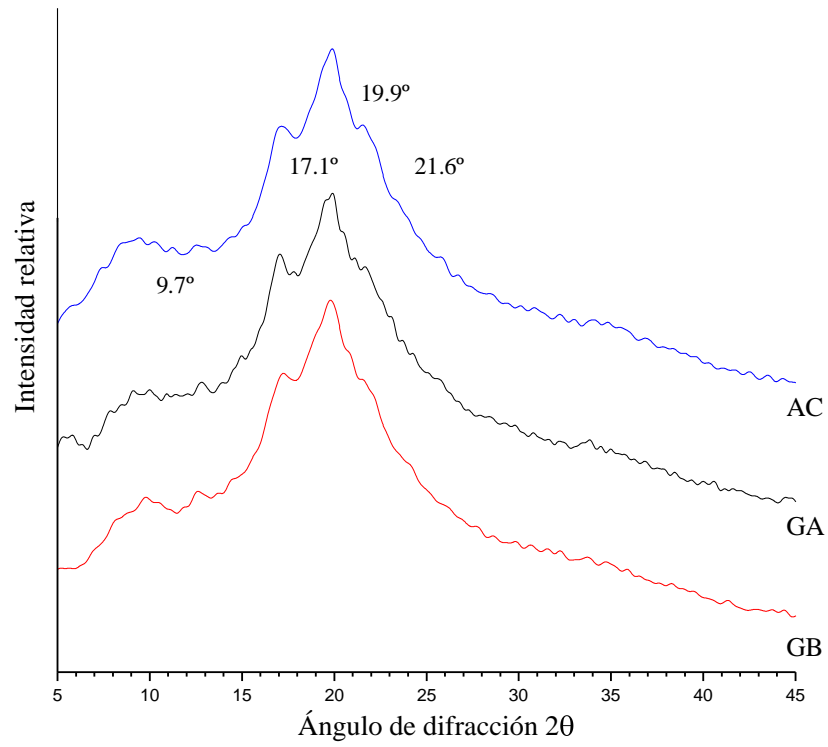


Fig. 18. Difractogramas de rayos X de las películas con 40% de glicerol. AC, almidón completo; GA, gránulos grandes; GB, gránulos pequeños.

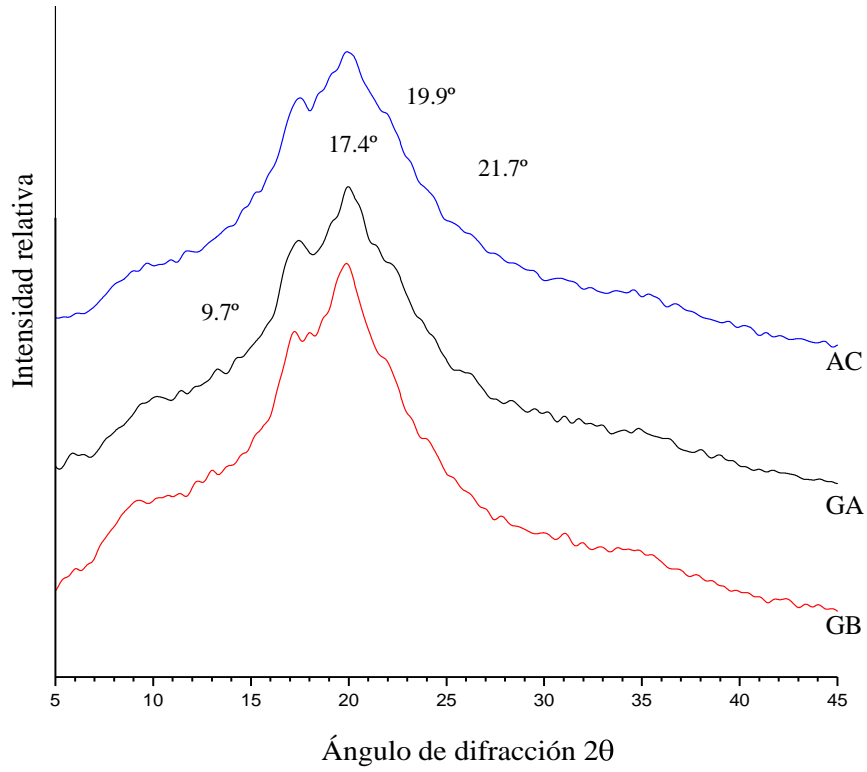


Fig. 19. Difractogramas de rayos X de las películas con 25% de glicerol. AC, almidón completo; GA, gránulos grandes; GB, gránulos pequeños.

Las películas donde se utilizó 25% de glicerol (Fig. 19) resultaron con una menor intensidad en los picos de cristalinidad. De acuerdo con Perry y Donald (2000) la adición de glicerol en soluciones para hacer películas de almidón, facilita la recristalización una vez gelatinizado. Durante la formación de la película se crean puentes de hidrógeno entre sus componentes (polímeros del almidón, plastificante y agua) formando un orden cristalino (Perry y Donald, 2000; Zamudio-Flores *et al.*, 2006). No se presentaron diferencias marcadas entre los distintos tipos de gránulos.

CONCLUSIONES

Las propiedades de las biopelículas elaboradas a partir de almidón de trigo cristalino fueron influenciadas por las propiedades inherentes de sus gránulos, así como por la concentración de plastificante empleado.

El contenido de glicerol tuvo un efecto significativo sobre las propiedades de las películas de almidón, ya que se observó que las películas resultaron homogéneas y extensibles. Además, debido al carácter hidrofílico del glicerol, la solubilidad de las películas aumentó conforme aumentaba la concentración del mismo.

Bajo las condiciones de este estudio, se observó que la estructura supramolecular de los diferentes tipos de gránulos, así como sus remanentes granulares (gránulos “fantasmas”) tuvieron influencia en las propiedades mecánicas de las películas, resultando en diferencias en la fuerza mecánica de las mismas.

Por otro lado, debido al tratamiento térmico, el patrón de cristalinidad que existía en el almidón nativo (tipo A) se modificó, encontrándose en las películas, la cristalinidad tipo Vh.

En este estudio, se comprobó que el almidón del trigo cristalino puede utilizarse como materia prima para la elaboración de biopelículas, con posibles aplicaciones en la industria alimentaria. Finalmente se puede mencionar que la utilización del almidón de trigo cristalino para la fabricación de biopelículas constituye un uso alternativo del mismo, lo que puede ayudar a un aprovechamiento integral de este recurso.

RECOMENDACIONES

1. Realizar estudios a nivel molecular en el almidón de trigo cristalino (variedad Júpare), con el fin de establecer si la estructura, el largo de las cadenas, el peso molecular de los polímeros, el grado de ramificación, entre otras características tienen un efecto significativo sobre las propiedades de las películas.
2. Utilizar diferentes tipos de plastificantes para conocer el efecto que tienen sobre las películas de almidón de trigo cristalino, así como variar la concentración de los mismos.
3. Realizar estudios para poder establecer posibles usos y aplicaciones a las películas obtenidas en este estudio, así como investigar sobre la vida útil durante su almacenamiento.

REFERENCIAS

- AACC. 2003. Approved Methods of American Association of Cereal Chemistry.
- Arandes, J.M., Bilbao, J. y López, D. 2004. Reciclado de Residuos Plásticos. Revista Iberoamericana de Polímeros Volumen 5.
- Askeland, D.R. 1998. Ciencia e Ingeniería de los Materiales. 3ª ed. Internacional Thomson Editores.
- Atwell, W.A., Hood, L.F., Lineback, D.R., Varriano-Marston, E. and Zobel, H.F. 1988. Terminology and methodology associated with basic starch phenomena. *Cereal Food World*. 33:306-311.
- Bastioli, C. 2001. Global status of the production of biobased packaging materials. *Starch/Stärke*. 53:351-355.
- Ban, W., Song, J., Argyropoulos, D.S. and Lucia, L.A. 2006. Influence of natural biomaterials on the elastic properties of starch-derived. Films: An Optimization Study. *Ind. Eng. Chem. Res.* 45:627-633.
- Ball, S., Guan H.P., James, M., Myers, A., Keeling, P., Mouille, G., Buleon, A., Colonna, P. and Preiss, J. 1996. From glycogen to amylopectin: a model for the biogenesis of plant starch granule. *Cell*. 86:349-352.
- Habig-McHught, T. and Krochta, J.M. Sorbitol- vs glycerol-plasticized whey protein edible films: integrated oxygen permeability and tensile property evaluation. *J. Agric. Food Chem.* 42:841-845.
- Bao, J.S., Cai, Y.Z. and Corke, H. 2001. Prediction of rice starch quality parameters of near-infrared reflectance spectroscopy. *J. Food Sci.* 66:936-939.
- Bechtel, D.B., Zayas, I., Keleikau, L., and Pomeranz, Y. 1990. Size-distribution of wheat starch granules during endosperm development. *Cereal Chem.* 67:59-63.
- Betchel, D.B. and Wilson, J. 2000. Variability in a starch isolation method and automated digital analysis system used for the study of starch size distribution in wheat flour. *Cereal Chem.* 77:401-405.
- Bello-Pérez, L.A. 2005. Almidón y Fibra Dietética: Química, Tecnología y Disponibilidad. Centro de Desarrollo de Productos Bióticos. Instituto Politécnico Nacional. Yatepec, Morelos.

- Campbell, M.R., Li, J., Berke, T.G. and Glover, D.V. 1996. Variation of starch granule size in tropical maize germ plasm. *Cereal Chem.* 73:536-538
- CANAMI. 2004. Cámara Nacional del Maíz Industrializado. Gana Mercado el trigo al maíz. http://www.cnmaiz.org.mx/boletin/archives/2004_07.html
- Chiotelli, E. and Le Meste, M. 2002. Effect of small and large wheat starch granules on thermomechanical behavior of starch. *Cereal Chem.* 79: 286–293.
- Chung, Y-L. and Lai, H-M. 2005. Water-barrier property of starch films investigated by magnetic resonance imaging. *Cereal Chem.* 82:131-137.
- Cooke, D. and Gidley, M.J. 1992. Loss of crystalline and molecular order during starch gelatinization. Origin of enthalpic transition. *Carbohydr. Res.* 227:103-112.
- Collado, L.S., Mabesa, R.C., and Corke, H. 1999. Genetic variation in the physical properties of sweet potato starch. *J Agric Food Chem.* 47:4195–4201.
- Cuadrado, T.R. y Abraham, G.A. 1997. Propiedades mecánicas de biomateriales. Instituto de Investigaciones en Ciencia y Tecnología de Materiales. Mar del Plata, Argentina.
- Debet, M.R., and Gidley, M.J. 2007. Why do gelatinized starch granules not dissolve completely? Roles for amylose, protein, and lipid in granule “ghost” integrity. *J. Agric. Food Chem.* 55: 4752-4760.
- Desroisier, N.W. 1983. *Elementos de Tecnología de Alimentos*. 1ª ed. Ed. CECOSA. México.
- Doane, W.M., and Peoria, I.L. 1992. USDA research on starch-based biodegradable plastic. *Starch/Stärke.* 44: 293–295.
- Dufresne, A. and Vignon, M R. 1998. Improvement of starch Film performances Using cellulose microfibrils. *Macromolecules.* 31:2693-2696.
- El-Khayat, G.H., Samaan, J. and Brennan, C.S. 2003. Evaluation of vitreous and starchy syrian durum (*Triticum durum*) wheat grains: the effect of amylose content on starch characteristics and flour pasting properties. *Starch/Stärke.* 55:358-365.
- Eliasson, A.C., and Karlsson, R. 1983. Gelatinization properties of different size classes of wheat starch granules measured with differential scanning calorimetry. *Starch/Stärke.* 35:130-133.

- Ellis, R.P., Cochrane, M.P., Dale, M.F.B., Duffus, C.M., Lynn, A., Morrison, I.M., Prentice, R.D.M., Swanston, J.S. and Tiller, S.A. 1998. Starch production and industrial use. *J. Sci. Food Agric.* 77:289–311.
- Encarta®. 2007. "Elasticidad (física)". Enciclopedia Microsoft® Online. Microsoft Corporation. <http://mx.encarta.msn.com>.
- Evers, A.D. 1971. Scanning electron microscopy of wheat starch. III. Granule development in the endosperm. *Starch/Stärke.* 23:57-162.
- Evers A.D. 1973. The size distribution among starch granules in wheat endosperm. *Starch/Stärke.* 25:303-304.
- Evers, A.D., Greenwood, C.T., Muir, D.D., Venables, C. 1974. Studies on the biosynthesis of starch granules. A comparison of properties of the small and large granules in mature cereal starches. *Starch/Stärke.* 26:42-46.
- Fabriani, G. and Lintas, C. 1998. *Durum Chemistry and Technology*. Ed. American Association of Cereal Chemists. St. Paul MN. USA.
- Fannon, J. E. and Bemiller, J. N. 1992. Structure of corn starch paste and granule remanents revealed by low-temperature scanning electron microscopy after cryo-preparation. *Cereal Chem.* 69:456–460.
- FAO. 2007. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Perspectiva de cosechas y situación alimentaria. No. 2. <http://www.fao.org>
- Fennema, O.R. *Food Chemistry*. 1996. 3^a ed. Ed. Marcel Dekker. New York.
- Fennema, O.R. *Química de los Alimentos*. 2000. 2^a ed. Ed. Acribia S.A. Zaragoza, España.
- Galarza-Mercado, J.M., Miramontes-Piña, U., Muñoz-Pérez, D., Hernández-Rivera, G. y Montiel-Sánchez, F. 2005. Situación Actual y Perspectivas Del Trigo 1990-2006. www.oeidrus-portal.gob.mx/.../Situacion%20Actual%20%20y%20Perspectivas%20del%20Sorgo%201990-2006.pdf
- García, M. A., Martino, M. N., Zaritzky, N. E. 1999. Edible starch films and coatings characterization: Scanning electron microscopy, water vapor transmission and gas permeabilities. *Scanning.* 21: 348-353.
- García, M.A., Pinotti, A. and Zaritzky, N. 2006. Barrier and mechanical properties of biodegradable composite films based on corn starch and chitosan. IACCHE.

- Genovese, D.B. and Rao, M.A. 2003. Role of Starch granule characteristics (volume fraction, rigidity, and fractal dimension) on rheology of starch dispersions with and without amylose. *Cereal Chem.* 80:350-355
- Godbillot, L., Dole, P., Joly, C., Roge, B. and Mathlouthi, M. 2006. Analysis of water binding in starch plasticized films. *Food Chemistry.* 96:380–386.
- Gómez, M.A. 2003. El Rincón de la Ciencia. Revista de divulgación del I.E.S. Victoria Kent. n° 21. <http://centros5.pntic.mec.es/ies.victoria.kent/Rincon-C/Curiosid/Rc-58.htm>
- Harper, M.J. 1981. *Extrusion of Foods. Volume I.* C.R.C. Press. Inc. Boca Raton, Florida. U.S.A.
- Hood, L.F. 1982. Current concepts of starch structure. In *Food Carbohydrates.* Ed. AVI Publishing Co. Inc. Westpost.
- Hoseney, R.C. 1991. *Principio de la Ciencia y Tecnología de los Cereales.* Ed. Acribia S.A. Zaragoza, España.
- Hucl, P. and Chibbar, R.N. 1996. Variation for starch concentration in spring wheat and its repeatability relative to protein concentration. *Cereal Chem.* 73:756-758.
- INEGI. 2006. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Con base en SEDESOL. DGOT. Subdirección de Asistencia Técnica a Organismos Operadores Urbanos Regionales. www.inegi.gob.mx/inegi/contenidos/espanol/prensa/Contenidos/estadisticas/2006/ambiente06.pdf
- Jacobs, H., Delcour, J.A. 1998. Hydrothermal modification of granular starch with retention of the granular structure: A review. *J. Agr. Food Chem.* 46:2895-2905.
- Jenkins, P.J., Cameron, R.E. and Donald, A.M. 1993. A universal feature in the structure of starch granules from different botanical sources. *Starch/Stärke* 45: 417-420.
- Katz, J.R. and Van-Itallie, T.B.Z. 1930. The physical chemistry of starch and bread making. All varieties of starch have similar retrogradation spectra. *Physik. Chemisty.* 150:90.
- Ke, T. and Sun, X. 2001. Thermal and mechanical properties of poly (lactic acid) and starch blends with various plasticizers. *American Society of Agricultural Engineers.* 44:945–953
- Lawton, J.W. 1996. Effect of starch type on the properties of starch containing films. *Carbohydr. Polym.* 29:203-208.

- Laohakunjit, N. and Noomhorm, A. 2004. Effect of plasticizers on mechanical and barrier properties of rice starch film. *Starch/Stärke*. 56:348-356.
- Larotonda, F.D.S., Matsui, K.N., Soldi, V. and Laurindo, B. 2004. Biodegradable films made from raw and acetylated cassava starch. *Brazilian Archives of Biology and Technology*. 47:477-484.
- Lim, S., Jane, J., Rajagopalan, S., and Seib, P.A. 1992. Effect of starch granule size on physical properties of starch-filled polyethylene film. *Biotechnol. Prog.* 8:51-57.
- Lineback, D.R. 1984. The starch granule: Organization and properties. *Baker Digest*, March. 16-21.
- Lindeboom, N., Chang, P.R. and Tyler, R.T. 2004. Analytical, biochemical and physicochemical aspects of starch granule size, with emphasis on small granule starches: a review. *Starch/Stärke*. 56:89-99.
- Liu, Z. and Han, J.H. 2005. Film forming characteristics of starches. *J. Food. Sci.* 70:31-36.
- Lu, G.Q., Huang, H.H. and Zhang, D.P. 2006. Application of near-infrared spectroscopy to predict sweetpotato starch thermal properties and noodle quality. *Journal Zhejiang Univ Sci.* 7:475-481.
- McGregor, A.W. 1979. Isolation of large and small granules of barley starch and a study of factors influencing the absorption of barley malt α -amylase by these granules. *Cereal Chem.* 56:430-434.
- Mali, S. Grossmann, M.V.E., García, M.A., Martino, M.N. and Zaritzky, N.Z. 2002. Microstructural characterization of yam starch films. *Carbohydr. Polym.* 50:379-386.
- Mali, S. 2004. Relationships among the composition and physicochemical properties of starches with the characteristics of their films. *J. Agric. Food Chem.* 52:7720-7725.
- Mali, S., Sakanaka, L., Yamashita, F. and Grossman, M.V. 2005. Water sorption and mechanical properties of cassava starch films and their relation to plasticizing effect. *Carbohydr. Polym.* 60:283-289.
- Mauro, D.J. 1996. An update on starch. *Cereal Food World.* 41:776-780.

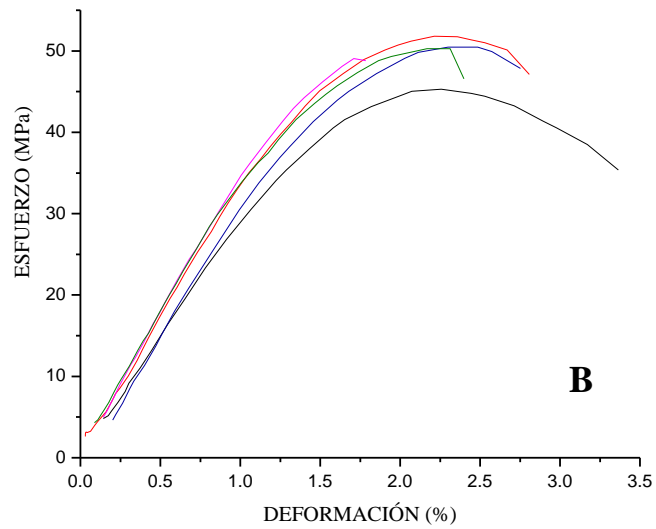
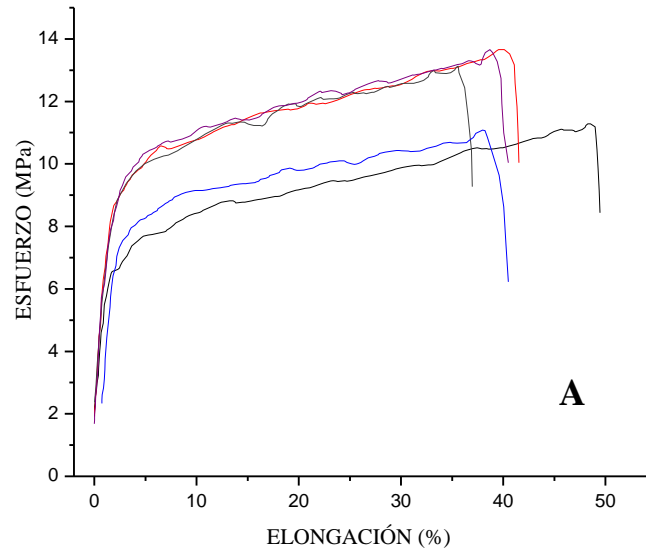
- Mehyar, G.F. and Han, J.H. 2004. Physical and mechanical properties of high-amylose rice and pea starch films as affected by relative humidity and plasticizer. *J. Food Sci.* 69:449-454.
- Morrison, W.R., and Scott, D.C. 1986. Measurements of the dimensions of wheat starch granule populations using a Coulter Counter with 100-channel analyzer. *J. Cereal Sci.* 4:13-21.
- Morrison, W.R. and Gadan, H. 1987. The amylose and lipid contents of starch granules in developing wheat endosperm. *J. Cereal Sci.* 5:263-275.
- Myllärinen, P., Autio, K., Schulman, A.H., Poutanen, K. 1998. Heat-induced structural changes of small and large barley starch granules. *J. Inst. Brewing.* 104:323-349.
- Nachtergaele, W. and Nuffel, V. 1989. Starch as stilt material in carbonless copy paper-new development. *Starch/Stärke.* 41:386-392.
- Norma Oficial Mexicana. 1996. NMX-ff-036-1996- SCFI.
- Novamont, S.P.A. 2001. Global status of the production of biobased packing materials. *Starch/Stärke.* 53:351-355.
- Pagella, C., Spingo, G. and Faveri, D.M. 2002. Characterization of starch based edible coatings. *Trans. Chem E.* 80:193-198.
- Peng, M., Gao, M., Abdel-Aal, E.-S.M., Hucl, P. and Chibbar, R.N. 1999. Separation and characterization of A- and B-type starch granules in wheat endosperm. *Cereal Chem.* 76: 375-379.
- Peña-Bautista, R.J., Pérez-Herrera, P., Villaseñor-Mir, E., Gómez-Valdez, M.M., Mendoza-Lozano, M.A. y Monterde-Gabilondo, R. 2007. Calidad de la cosecha del trigo en México. Ciclo otoño-invierno 2005-2006. Publicación Especial del CONASIST. w4.siap.gob.mx/sispro/IndModelos/SP_AG/Varios/CalTrigo.pdf
- Perry, P.A. and Donald, A.M. 2000. The role of plasticization in starch granule assembly. *Biomacromolecules.* 1:424-432.
- Raeker, M.O., Gaines, C.S., Finney, P.L. and Donelson, T. 1998. Granule size distribution and chemical composition of starches from wheat cultivars. *Cereal Chem:* 75:721-728.
- Rayas, J.A., Rodríguez-Vera, R., y Martínez, A. 2003. Medición del módulo de Young en el hule látex usando ESPI. *Revista Mexicana de Física.* 49:555-564.

- Rindlav-Westling, A. and Gatenholm, P. 2003. Surface composition and morphology of starch, amylose, and amylopectin films. *Biomacromolecules*. 4:166-172.
- Rodríguez, P., San-Martín, M.E. y González-de-la-Cruz, G. 2001. Calorimetría diferencial de barrido y rayos-x del almidón obtenido por nixtamalización fraccionada. *Sociedad Mexicana de Ciencia de Superficies y de Vacío*. 13:61-65.
- Rodríguez, G.F. 2002. Calidad de los Trigos Cristalino Cosechados en el Estado de Sonora Durante el Ciclo 1998-1999. Tesis Profesional de Licenciatura, Especialidad Tecnología de Alimentos. Departamento de Ciencias Químico-Biológicas, Universidad de Sonora.
- SAGARPA. 2007. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Oferta estimada de granos ciclo 01 2006/2007 de maíz, trigo y sorgo para consumo humano y uso forrajero. www.sagarpa.gob.mx/cmdrs/reunion3.pdf
- Saiah, R. Sreekumar, P.A. Leblanc, N. Castandet, M. and. Saiter, J-M. 2007. Study of wheat-flour-based agropolymers: Influence of plasticizers on structure and aging behavior. *Cereal Chem*. 84:276–281
- Sandoval, A., Rodríguez, E. y Fernández, A. 2005. Aplicación del análisis por calorimetría diferencial de barrido (DSC) para la caracterización de las modificaciones del almidón. *Universidad Nacional de Columbia. Dyna Medellín*. 146:45:53.
- Seib, P.A. 1994. Wheat starch: Isolation, structure and properties. *Oyo Toshitsu Kagaku*. 41:49-69.
- Serna-Saldivar, S.R.O. 1996. Química, Almacenamiento e Industrialización de los Cereales. 1ª ed. A.G.T. Editor, S.A. México, D.F.
- Shinde, S.V., Nelson, J.E. and Huber, K.C. 2003. Soft wheat starch pasting behavior in relation to A- and B- type granule content and composition. *Cereal. Chem*. 80: 91-98.
- SIAP. 2004. Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera. Participación por estado en el valor de la producción nacional de trigo grano 1994-2004. http://w4.siap.gob.mx/sispro/IndModelos/SP_AG/Trigo/Descripcion.pdf
- SIAP. 2006. Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera. w4.siap.gob.mx/sispro/IndModelos/SP_AG/Trigo/Descripcion.pdf

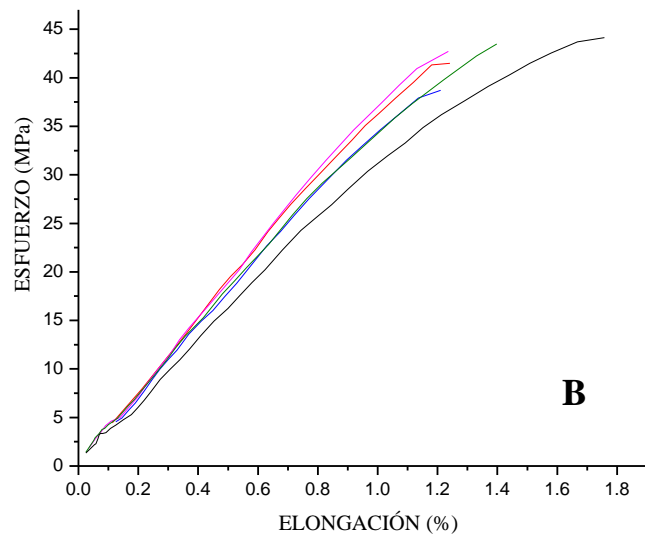
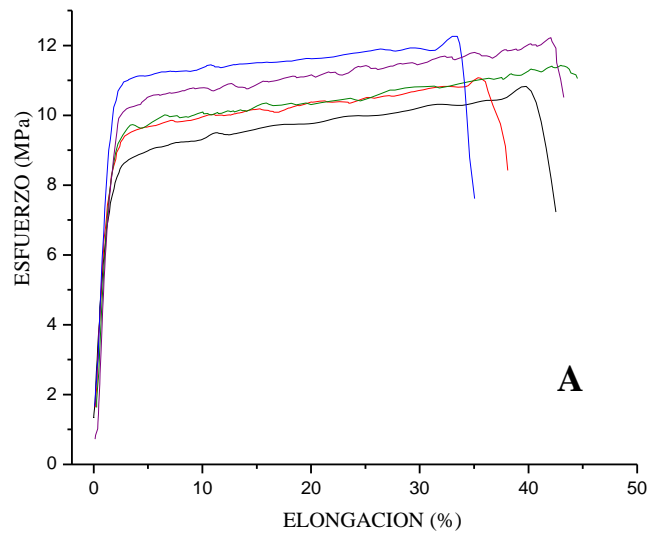
- Smith, W.F. 1993. Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales". 2^a ed. Ed. McGraw-Hill.
- Stoddard, F.L. 1999. Survey of starch particle-size distribution in wheat and related species. *Cereal Chem.* 76:145-149.
- Takeda, Y., Takeda, C., Misukami, H., Hanashiro, I., 1999. Structures of large, medium and small starch granules of barley grain. *Carbohydr. Polym.* 38: 09-114.
- Thebaudin, J.U., Lefebvre, A.C., and Doublier, J.L. 1998. Rheology of starch pastes from starches of different origins: Applications to starch-based sauces. *Carbohydrate Polymer.* 37:354-360.
- Thiré, R.M.S.M. and Andrade, C.T. 2005. Effect of Aging on the Microstructure of Plasticized Cornstarch Films. *Polímeros: Ciência e Tecnologia.* 15: 130-133.
- Thomas, D.J., and Atwell, W.A. 1999. *Starches. Practical Guide for the Food Industry.* Eagan Press. St. Paul MN.
- Thunwall, M., Boldizar, A. and Rigdahl, M. 2006. Compression molding and tensile properties of thermoplastic potato starch materials. *Biomacromolecules* 7:981-986
- UMU. Universidad de Murcia. Aula virtual de biología. 2005. www.um.es/~molecula/gluci05.htm.
- UN. Universidad Nacional de Colombia. 2005. Capítulo 1. Biología celular polisacáridos. http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ciencias/2000024/lecciones/cap01/01_01_05.htm.%20
- USWA. 2006. United State Wheat Associates. Trigonoticias. Mercado de futuros del trigo en los EUA. Vol. 25/34. <http://www.uswheat.org/spanish/doc/55AE91EE6FB49012842571D80072419B?OpenDocument>
- Vansteelandt, J. and Delcour, J.A. 1999. Characterization of starch from durum wheat. *Starch/Stärke.* 51:73-80.
- Vasanthan, T. and Bhatta, R.S. 1996. Physicochemical properties of small- and large-granule starches of waxy, regular, and high-amylose barley. *Cereal Chem.* 73: 199-207.
- Weeb-Jenkins, J. 2002. Biodegradable packing for the green consumer. *Fruit Proc.* 12: 268-269.

- Xu, Y., Miladinov, V. and Hanna, M. 2004. Synthesis and characterization of starch acetates with high substitution. *Cereal Chem.* 81: 735–740.
- Yang, L. Paulson, A.T. 2000. Mechanical and water vapor barrier properties of edible gellan films. *Food Res. Int.* 33:563-560.
- Yang, J.H., Yu, J.G., Ma, X.F. 2006. Preparation and properties of ethylenbisformamide plasticized potato starch (EPTPS). *Carbohydr. Polym.* 63:218-223.
- Yang, J-H., Yu, J-G., Ma, X-F. 2006. Preparation of novel thermoplastic starch (TPS) material using ethylenebisformamide as the pasticizer. *Starch/Stärke.* 58:330-337.
- You, S. and Lim, S. 2000. Molecular characterization of corn starch using an aqueous HPSEC-MALLS-RI system various dissolution and analytical conditions. *Cereal Chem.* 77:303-308.
- Yu, J.G., Chen, S.Z., Gao, J.P., Zheng, H.W., Zhang, J. and Lin, T. 1998. A study on the properties of starch/glycerol blend. *Starch/Stärke.* 50:246–250.
- Zamudio-Flores, P.B., Vargas-Tórres, A., Pérez-González, J., Bosquez-Molina, E. and Bello-Pérez, L.A. 2006. Films prepared with oxidized bananada starch: Mechanical and barrier properties. *Starch/Stärke.* 58:274-282.
- Zhang, Y. and Han, H. 2006. Plasticization of pea starch films with monosaccharides and polyols. *Journal of Food science.* 71:253–261.
- Zheng, G.H. y Sosulsky, F.W. 1997. Physicoquimical properties of small granules starches. AACC Annual Meeting, San Diego.
- Zobel, H.F. 1984. Gelatinization of starch and mechanical properties of starch pastes. In: *Starch: Chemistry and Technology.* New York Academic Press.
- Zobel, H. F. 1988. Molecules to granule: a comprehensive starch review. *Starch/Stärke.* 40:44-50.

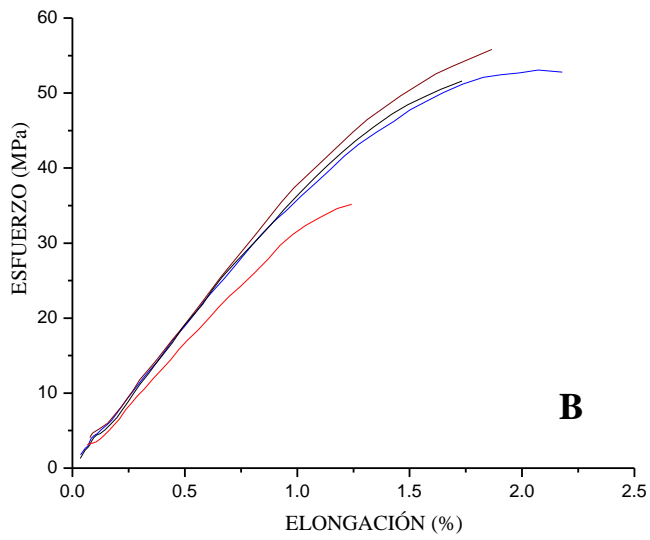
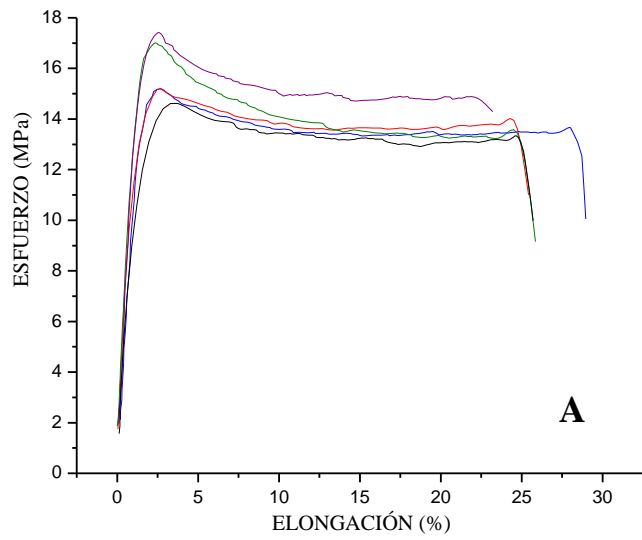
ANEXO I



Figs. A-1. Curvas de esfuerzo-deformación de las películas de almidón completo. (A) 40 % y (B) 25 % glicerol.



Figs. A-2. Curvas de esfuerzo-deformación de las películas de los gránulos grandes (GA). (A) 40 % y (B) 25 % glicerol.



Figs. A-3. Curvas de esfuerzo-deformación de las películas de los granulos pequeños (GB). (A) 40 % y (B) 25 % glicerol.

Tabla A-1. Valores promedio de las propiedades mecánicas evaluadas (esfuerzo de tensión, porcentaje de elongación y módulo de elasticidad) en las películas de almidón de trigo cristalino.

TA ¹	Esfuerzo de Tensión (MPa)		Elongación (%)		Módulo de Young (MPa)	
	40 %	25 %	40 %	25 %	40 %	25 %
AC ³	12.70 ± 0.58 ⁶	49.38 ± 1.11	41.05 ± 2.21	2.62 ± 0.26	4.31 ± 0.44	31.49 ± 0.99
GA ⁴	11.79 ± 0.31	42.26 ± 1.09	38.87 ± 2.31	1.42 ± 0.11	5.36 ± 0.32	33.38 ± 1.34
GB ⁵	16.28 ± 0.57	44.36 ± 4.03	24.60 ± 0.51	1.73 ± 0.17	11.30 ± 0.32	33.32 ± 0.68

¹TA, tipo de almidón; ²CG, concentración de glicerol; ³AC, almidón completo; ⁴GA, gránulos A; ⁵GB, gránulos B; ⁶error estándar de la media.

Tabla A-2. Valores promedio del porcentaje de solubilidad evaluado en las películas de almidón de trigo cristalino.

TA ¹ CG ²	Solubilidad (%)	
	40 %	25 %
AC ³	14.06 ± 0.66	0.21 ± 0.03
GA ⁴	7.55 ± 0.11	1.16 ± 0.17
GB ⁵	10.91 ± 1.62	0.98 ± 0.33

¹TA, tipo de almidón; ²CG, concentración de glicerol; ³AC, almidón completo; ⁴GA, gránulos A; ⁵GB, gránulos B; ⁶error estándar de la media.