



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE ALMIDONES  
TERMOPLÁSTICOS (TPS).**

**TESIS MANCOMUNADA**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTAN**

**VICTOR JIMÉNEZ SÁNCHEZ**

**ALEJANDRO OLVERA ROMO**



**MÉXICO, D.F.**

**AÑO 2014**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:** Profesor: MARCO ANTONIO URESTI MALDONADO

**VOCAL:** Profesor: CARLOS GUZMÁN DE LAS CASAS

**SECRETARIO:** Profesor: ANGEL ENRIQUE CHÁVEZ CASTELLANOS

**1er. SUPLENTE:** Profesor: MINERVA ESTELA TÉLLEZ ORTIZ

**2° SUPLENTE:** Profesor: GERARDO OMAR HERNÁNDEZ SEGURA

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**  
**CONJUNTO EDIFICIO D FACULTAD DE QUÍMICA**  
**U.N.A.M.**  
**CIUDAD UNIVERSITARIA**  
**COYOACÁN, D.F.**

**ASESOR DEL TEMA:**

---

**MARCO ANTONIO URESTI MALDONADO**

**SUSTENTANTES:**

---

**VICTOR JIMÉNEZ SÁNCHEZ**

---

**ALEJANDRO OLVERA ROMO**

## Índice.

Glosario.....	1
Resumen.....	3
1.- Introducción.....	4
Objetivos.....	6
2.- Antecedentes.....	7
2.1.- Plásticos Biodegradables.....	7
2.1.1.- Biodegradabilidad.....	8
2.1.2.- Aplicaciones biopolímeros.....	8
2.1.2.1.- Industria alimentaria.....	8
2.1.2.2.- Industria farmacéutica.....	9
2.1.2.3.- Sector agropecuario.....	10
2.2.- Almidones Termoplásticos.....	11
2.2.1.- Áreas de investigación.....	12
2.3.- El maíz.....	12
2.3.1.- Antecedentes históricos.....	12
2.3.2.- Importancia mundial.....	14
2.3.3.- Almidón de maíz.....	15
2.4.- La yuca.....	18
2.4.1.- Antecedentes históricos.....	18
2.4.2.- Importancia mundial y en México.....	19
2.4.3.- Almidón de yuca.....	20
2.4.3.1.- Proceso de obtención.....	21
2.5.- Plastificantes y aditivos.....	22
2.5.1 Plastificantes.....	22
2.5.1.1.- Agua destilada.....	23
2.5.1.2.- Sorbitol.....	24

2.5.1.3.- Polietilenglicol (PEG).....	25
2.5.2 Aditivos.....	26
2.5.2.1.- Ácido cítrico.....	27
2.5.2.2.- Urea.....	28
2.5.2.3.- Cloruro de sodio.....	29
2.5.2.4.- Negro de humo.....	30
2.6.- Almidones Termoplásticos.....	31
2.6.1.- Gelatinización.....	31
2.6.2.- Extrusión.....	32
2.6.2.1.- Parámetros de procesado.....	33
2.7.- Caracterización.....	34
2.7.1.- Módulo de Young.....	34
2.7.2.- Microscopia electrónica de barrido (SEM).....	35
2.7.3.- Espectroscopia infrarroja.....	36
2.7.4.- Calorimetría diferencial de barrido.....	37
2.7.4.1.-Temperatura de transición vitrea (Tg).....	38
2.7.4.2.- Temperatura de fusión (Tm).....	39
2.7.4.3.-Temperatura de descomposición (Td).....	39
2.8.- Diseño de experimentos, Método Taguchi.....	40
3.- Experimentación.....	42
3.1.- Parte experimental 1. Experimentación y selección de condiciones de procesamiento para los TPS.....	42
3.1.1.- Sustancias y equipo.....	42
3.1.2.- Metodología.....	43
3.1.3.- Procedimiento experimental.....	44
3.1.3.1.- Diagrama de flujo.....	44
3.1.3.2.- Preparación.....	45
3.1.3.3.- Condiciones de procesamiento por muestra.....	45
3.2.- Parte experimental 2. Obtención y caracterización de los TPS.....	46

3.2.1.- Sustancias y equipo.....	46
3.2.2.- Diseño experimental.....	47
3.2.3.- Procedimiento experimental.....	49
3.2.3.1.- Diagrama de flujo.....	49
3.2.3.2.- Preparación.....	50
3.2.3.3.- Condiciones de procesamiento por muestra	51
3.2.4.-Caracterización de muestra.....	52
3.2.4.1.-Pruebas mecánicas (módulo de Young).....	53
3.2.4.2.- Espectroscopia de infrarrojo (IR).....	54
3.2.4.3.- Microscopia electrónica de barrido (SEM)...	54
3.2.4.4.- Calorimetría diferencial barrido (DSC).....	55
4.- Resultados y discusión.....	56
4.1.- Etapa 1: Experimentación y selección de condiciones de procesamiento para los TPS.....	56
4.1.1.- Mezclado.....	56
4.1.2.- Gelatinización del almidón.....	56
4.1.3.- Secado de gel.....	57
4.1.4.- Extrusión.....	57
4.2.- Etapa 2: Obtención y caracterización de los TPS.....	59
4.2.1.- Mezclado.....	59
4.2.2.- Gelatinización del almidón.....	59
4.2.3.- Secado de gel.....	60
4.2.4.- Extrusión.....	60
4.2.5.- Fragmentado.....	61
4.2.6.- Obtención de biopelículas.....	62
4.2.7.-Caracterización de los TPS.....	63
4.2.7.1.-Pruebas mecánicas. Módulo de Young.	63
4.2.7.2.- Calorimetría diferencial de barrido. (DSC).	67
4.2.7.3.- Microscopia electrónica de barrido (SEM).	70

4.2.7.4.- Espectroscopia infrarroja (IR).....	72
4.3.- Análisis estadístico.....	73
4.4.- Aplicaciones.....	77
5.- Conclusiones y recomendaciones.....	81
5.1.- Conclusiones.....	81
5.2.- Recomendaciones.....	83
6.-Bibliografía.....	85
7.- Apéndices.....	91

## Glosario de Términos.

PHB	Ácido polihidroxitubúrico.
PLA	Ácido poliláctico.
PGA	Ácido poliglicólico.
PVOH	Alcohol polivinílico.
TPS	Almidones termoplásticos.
$T_c$	Temperatura de cristalización.
$T_D$	Temperatura de descomposición.
$T_g$	Temperatura de transición Vitrea.
$T_m$	Temperatura de fusión.
wc	Ancho de la sección estrecha (m)
at	Área transversal ( $m^2$ )
DSC	Calorimetría diferencial de barrido.
$\vec{F}$	Carga o fuerza por área ( $\vec{kg}$ )
$\epsilon$	Deformación unitaria en cualquier punto de la barra.
$\Delta T$	Diferencia de temperatura
PSD	Distribución de tamaño de partícula.
IR	Espectroscopia infrarroja.
g	Espesor de la probeta (m)
WAI	Índice de absorción de agua.
WSI	Índice de solubilidad en agua.
wx	Maíz ceroso.
SEM	Microscopia electrónica de barrido.
TEM	Microscopia electrónica de transmisión.
E	Módulo de elasticidad longitudinal.
NMX	Norma Mexicana.
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
PEG	Polietilenglicol.



PCL	Policaprolactona.
PHA	Polihidroxicanoato.
P/P	Porcentaje peso peso.
$\sigma$	Presión ejercida sobre el área de sección transversal.
UV	Radiación ultravioleta.
ASTM	American Society for Testing and Materials. (Sociedad Americana para Materiales y Pruebas).
Tm	Toneladas métricas.
TLC	Tratado de libre comercio.
USAI	Unidad de Servicios en Apoyo a la Investigación.
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México.

## Resumen.

En el presente trabajo se estudió el proceso para la obtención y caracterización de almidones termoplásticos (TPS) – biopolímeros a partir de almidón de maíz y yuca-. Los biopolímeros termoplásticos son utilizados como una alternativa al uso de plásticos sintéticos ya que se degradan en tiempos cortos sin afectar los ecosistemas y por lo tanto son más amigables al ambiente.

En el desarrollo de este trabajo se establecieron los factores principales que afectan el proceso, así como mejorar las propiedades fisicoquímicas de los TPS. La investigación consistió en averiguar cuál de los plastificantes (Sorbitol, Polietilenglicol) ofrece el mejor resultado para la producción de los TPS. Además se utilizaron una serie de aditivos tales como: cloruro de sodio, urea y ácido cítrico, con los cuales se pretende mejorar la resistencia, el procesado y la durabilidad del producto.

Obtenidos dichos TPS, se llevó a cabo la caracterización mediante la determinación de: Pruebas mecánicas (módulo de Young), espectroscopia de infrarrojo, calorimetría diferencial de barrido (DSC) y resistencia al agua.

## **1.- Introducción.**<sup>3,17</sup>

Los polímeros son conocidos químicamente como moléculas formadas por un gran número de eslabones, los cuales son generalmente moléculas orgánicas simples que contienen un doble enlace o un mínimo de dos grupos funcionales, donde el proceso de transformación de las moléculas de monómero a una molécula de polímero se llama polimerización.

Los productos de plásticos de origen petroquímico como: botellas, envases, fibras, recubrimientos, adhesivos, etc., requieren de un tiempo prolongado para degradarse. Su gran presencia en los cuerpos de agua ha dejado de ser sólo un problema estético, ya que estos afectan los ecosistemas acuáticos y a los organismos que los habitan. Este es solamente uno de los numerosos problemas ambientales que generan estos materiales, unido al aumento en el costo del crudo y el agotamiento de las reservas de petróleo ha provocado que las recientes investigaciones busquen desarrollar materiales ambientalmente amigables.

A partir de materiales de origen natural se desea sustituir o disminuir el uso de materiales procedentes del petróleo, así como el desarrollo de nuevos materiales y métodos de producción que permitan generar plásticos que presenten propiedades similares a los de origen sintético pero con periodos de degradación más cortos.

Los polímeros de fuentes renovables, también conocidos como biopolímeros, han aumentado en popularidad, debido a la ya mencionada preocupación ambiental y los niveles finitos de las reservas de petróleo. Un área que ha sido investigada es la obtención de los biopolímeros utilizando como precursor almidones termoplásticos (TPS). Los cuales, después de su uso, pueden ser degradados por bacterias e incorporarse al ambiente.

Entre los almidones termoplásticos resaltan los producidos a partir de almidón de maíz y tapioca, debido a numerosas investigaciones que han arrojado resultados de un buen procesamiento con características físicas destacables.

El almidón es un polímero biodegradable de bajo costo que es almacenado como gránulos en las plantas y tubérculos.

Al plastificar el almidón tiene propiedades muy pobres. Sin embargo, esas propiedades pueden ser mejoradas con aditivos como; cloruro de sodio, ácido cítrico, polisorbato 20, etc.

En base a lo anterior se ha establecido los siguientes objetivos.

## Objetivo General.

- Estudiar el proceso de obtención y caracterización de termoplásticos a partir de almidón de: maíz y yuca, así como establecer las condiciones para su procesamiento.

## Objetivos particulares

- Establecer los factores que afectan el procesamiento de los almidones termoplásticos para mejorar sus propiedades fisicoquímicas.
- Examinar si los plastificantes: sorbitol y polietilenglicol ofrecen aceptables resultados en la producción de almidones termoplásticos.
- Comparar los almidones termoplásticos de maíz y yuca y establecer cuáles presentan mejores características.
- Analizar los posibles usos industriales y generales de los almidones termoplásticos obtenidos.

## 2.- Antecedentes.

### 2.1.- Plásticos Biodegradables.<sup>3,12,13,15,18,27,52</sup>

Los plásticos biodegradables son materiales que los microorganismos (bacterias u hongos) pueden descomponer en agua, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y otros biomateriales. Es importante subrayar que los plásticos biodegradables no están fabricados necesariamente con biomateriales (ej. con plantas). Muchos plásticos biodegradables están fabricados a partir del petróleo igual que los plásticos convencionales.

El tratamiento de los desechos basados en polímeros biodegradables es más limpio gracias a su degradación, pero deben separarse de los polímeros convencionales ya que los biopolímeros afectan el reciclado contaminando el producto final. Esto hace que sea necesario indicar cuando un envase está elaborado de biopolímeros.

Existen numerosas clasificaciones de los biopolímeros, todas estas intentan definir de manera correcta los diferentes materiales, de acuerdo a las necesidades los científicos, expertos y personas dedicados a la industria de los polímeros.

Una de las clasificaciones más utilizadas y más sencillas es la basada en su origen y el método en que se producen y así se tienen:

- a) Polímeros extraídos o removidos directamente de la biomasa: polisacáridos como almidón, hules y celulosa. Proteínas como caseína, queratina y colágeno.
- b) Polímeros producidos por síntesis química clásica utilizando monómeros biológicos de fuentes renovables. Algunos ejemplos de este grupo son: ácido poliláctico (PLA), ácido poliglicólico (PGA) y policaprolactona (PCL).

- c) Polímeros producidos por microorganismos, bacterias productoras nativas o modificados genéticamente. Este grupo engloba a: Polihidroxialcanoatos (PHA) y poli-3-hidroxibutarato (PHB).
  
- d) Polímeros producidos por mezcla de polímeros biodegradables.

#### 2.1.1.- Biodegradabilidad

Es la degradación provocada por la actividad biológica, por microorganismos que producen enzimas y cambian la estructura química del material. Estos materiales se descomponen en moléculas de CO<sub>2</sub> y agua en un tiempo determinado dependiendo de su naturaleza. La geometría del producto, la estabilidad de la molécula y el medio influyen en la biodegradabilidad<sup>1</sup>.

La norma ASTM D 6954-04 determina las condiciones para el estudio de la degradación de los plásticos en el ambiente mediante la combinación de oxidación y biodegradación.

#### 2.1.2.- Aplicaciones de los biopolímeros.

##### 2.1.2.1.- Industria alimentaria.

El campo de aplicación de las biopelículas de almidón termoplástico es creciente tanto para aplicaciones rígidas y flexibles.

---

<sup>1</sup> La biodegradabilidad es una propiedad material que depende en gran manera de las circunstancias del medio biológico (el cuerpo humano es distinto de la tierra). De hecho, podemos decir que no tiene mucho sentido fabricar un producto, como una bolsa de plástico, para que se pueda descomponer, porque su capacidad de biodegradarse no va a resolver el problema de los desechos. (condiciones diferentes en el compost y en la tierra).

Uno de los principales campos donde son empleadas es la industria alimenticia como envases primarios, secundarios, terciarios y envases comestibles, estos últimos muchas veces no son reconocidos como envases.

Su función como envase es ofrecer una barrera selectiva para retardar o evitar el contacto de la humedad, gases, aceites, grasas; mejorar las propiedades para la manipulación de los alimentos; impedir la disminución de los atributos sensoriales, el contenido nutricional, la proliferación de microorganismos no deseados y retener compuestos volátiles característicos de los alimentos.

Los bioenvases son definidos como los materiales elaborados a base de fuentes biológicas y a su vez son derivados de recursos renovables, de este modo se excluye a la celulosa por regenerarse entre 25 y 65 años.

En la actualidad se encuentran disponibles para su comercialización biopolímeros biodegradables, tales como: Polímeros de ácido láctico, copoliésteres alifáticos, copolímero de politereftalato de etilo y un poliéster biodegradable entre otros. Todos estos son producidos por grandes empresas como Procter & Gamble (P&G), Du Pont, Cargill Dow LLC, etcétera.

#### 2.1.2.2.- Industria farmacéutica

En el campo farmacéutico se utilizan en la fabricación de cápsulas y pastillas que proporcionan una barrera física, un medio útil para el control de absorción de los principios activos por el consumidor, enmascarar el sabor desagradable de algunos fármacos es una tecnología sencilla de pocas operaciones.

Como desventajas en este campo están su susceptibilidad a la humedad y al calor, así como los costos debido a las tecnologías patentadas.



### 2.1.2.3.- Sector agropecuario.

En el sector agropecuario hay un creciente interés por el desarrollo de películas biodegradables que funcionen como cubiertas para protección a suelos y eventualmente mejorar su fertilidad y ahorro de agua, esta técnica es mejor conocida como acolchado. Se le han atribuido ventajas como un elemento que mantiene la actividad de los organismos del suelo, proporciona nutrientes, protege a la tierra de la desecación y el encostramiento, mantiene la humedad y temperatura uniforme e impide el crecimiento no deseado de hierbas adventicias que pueden propiciar la aparición de plagas y robo de nutrientes al sembradío de interés.

Se han empleado un sinnúmero de materiales para el acolchado como: la paja que protege el suelo, facilita la aireación y el humedecimiento además de ser de lenta descomposición; piedras, grava y arena que mantienen la humedad, la estructura y una temperatura constante y plástico, este último ya de venta comercial para dicho uso, siendo los acolchados más utilizados en la actualidad.

Los principales problemas a los que se enfrenta la utilización de acolchados son el precio del plástico, los costos de manejo y la dificultad de recoger los restos de plástico después de la cosecha. Por ello los acolchados biodegradables han generado un creciente interés.

Una ventaja adicional es su colocación, ya que se emplea la misma maquinaria para plásticos convencionales.

Aunque los polímeros biodegradables, en especial los TPS, carecen de propiedades mecánicas como las del polietileno, han mostrado en algunos casos ser suficientemente resistentes para el acolchado. En resumidas cuentas se busca que el material funcione durante el cultivo aproximadamente en algunos casos de

2 a 6 meses y que sea de fácil eliminación y un bajo costo de producción frente al polietileno negro.

De esta forma se podrían mencionar un sinnúmero de aplicaciones, pero no es del interés en este trabajo hacer un análisis de todas las ramas y diversos sectores en los que se podría incursionar<sup>59</sup>.

## 2.2.- Almidones Termoplásticos.<sup>23, 24,26,40,56</sup>

Los almidones termoplásticos (TPS), por sus siglas en inglés, son materiales renovables y pueden incorporarse al suelo como abono orgánico.

La mayoría de los materiales plásticos tradicionales son inertes al ataque microbiano, es por ello que el interés se ha dirigido al desarrollo de polímeros biodegradables obtenidos de recursos naturales renovables. En la actualidad existe una gran investigación básica y aplicada sobre el almidón, por ser una materia prima natural, barata y abundante.

El desarrollo y producción de almidones termoplásticos biodegradables, se considera importante para reducir la cantidad total de desechos plásticos sintéticos en el mundo.

Los TPS son materiales que se obtienen por la modificación estructural que se da dentro del almidón cuando éste es procesado con un bajo contenido de agua y la acción de fuerzas térmicas y mecánicas en presencia de plastificantes que no se evaporan fácilmente durante el procesamiento. Los TPS presentan varios atributos, además de su biodegradabilidad, son renovables, flexibles y se pueden acondicionar muy fácilmente en diferentes procesos de termoplastificación usando procesos estándar utilizados en la fabricación de polímeros sintéticos, tales como inyección por moldeo, extrusión por soplado, moldeo por inyección, moldeo por compresión, extrusión de película plana y termoconformado.

### 2.2.1.- Áreas de Investigación.<sup>1,59</sup>

Las investigaciones de la década 1993-2003 se enfocaron hacia el estudio del término TPS, para facilitar el desarrollo específico de productos basados en este material. Así, los retos se subdividieron en las siguientes áreas:

- Producción, caracterización y almidones fraccionados.
- Optimización de los procesos y análisis de sus mecanismos.
- Seguimiento de la plastificación y cambio de las propiedades.
- Modificación química, física y mezclas.
- Modelamiento del cambio de las propiedades en relación con el tiempo y estudios de biodegradación.
- Estudio de factibilidad en la manufacturación y la aplicación en nuevas investigaciones.

Como se ha mencionado los materiales objeto de este estudio fueron:

- a) El almidón de maíz.
- b) El almidón de yuca.

### 2.3.- El maíz.<sup>1,9,10,11,12,21,22,39,41,42,43,44,45,46,47</sup>

#### 2.3.1.- Antecedentes históricos.

Entre el 2300 y 1500 a. C. apareció en el territorio mesoamericano una nueva forma de vida: el florecimiento del mundo aldeano, con las primeras sociedades sedentarias asentadas en las proximidades de los lagos y fuentes de agua. Estos pioneros tenían actividades de producción agrícola reflejadas en la presencia de instrumentos de molienda y plantas domesticadas, en particular del maíz.

Las civilizaciones mesoamericanas y su amplio desarrollo en el ámbito de la agricultura es el más claro precedente de la importancia del maíz en latinoamérica y especialmente en México.

Maíz es un vocablo propio de los indios que habitan la zona del caribe y significa “lo que sustenta la vida”. Esto habla del gran valor que tenía para estas culturas, aunque no fue la primera planta domesticada.

Tratar de conocer el proceso de domesticación del maíz ha llevado a grandes investigaciones en la botánica y arqueología. Al intentar identificar a los ancestros silvestres del maíz se ha llegado a numerosas interpretaciones de su origen, donde la más aceptada es la hibridación y entrecruzamiento de una variedad primitiva con su pariente más cercano, el teosinte silvestre. Otra reconoce su origen a partir de un maíz palomero silvestre ya extinto.

El descubrimiento de la agricultura hace miles de años fue un punto clave para el cambio y el desarrollo de las sociedades, ya que el sedentarismo, como forma de asentamiento de las primeras aldeas, fue influido por la domesticación de plantas y animales y la formación de sociedades en las que el líder social y religioso influían en la vida de su grupo.

La observación del campesino le permitió paulatinamente conocer su entorno y los factores que lo afectan. El establecimiento de un calendario basado en temporadas de sequías, lluvias, el movimiento solar y de los astros le otorgaron la oportunidad de desarrollar la formación de sociedades complejas económica, religiosa y políticamente establecidas en centros o grandes urbes donde la producción agrícola era de suma importancia.

El desarrollo de mejores técnicas de cultivar el maíz llevó al surgimiento de creencias, prácticas religiosas y una cosmogonía dándole al maíz un matiz

sagrado haciendo que los colonizadores se ocuparon de cultivar y cosechar trigo, así como de establecer la ganadería, pero adaptando a sus dietas al maíz.

El mestizaje alimentario caracterizó a las ciudades del México independiente y, hasta nuestros días, el maíz continúa siendo la dieta popular y con un gran papel dentro de los platillos de alta cocina mexicana.

### 2.3.2.- Importancia mundial.

Los nuevos tipos de maíz son derivados de razas primitivas nativas mexicanas así como de centro y sudamérica. Los diferentes tipos de maíz fueron ocupados para la producción de alimentos, bebidas y medicamentos.

El maíz amarillo y blanco son los principalmente producidos en México y los Estados Unidos. Dentro del territorio mexicano es de los cultivos básicos con mayor producción y consumo. En 2010 el cierre de la producción agrícola de maíz grano fue de 23,301,878.98 toneladas, de maíz forrajero 11,778,483.64 toneladas, maíz grano semilla 31,451.00 toneladas y maíz palomero 1,890 toneladas. Sobre el consumo aparente nacional fue 30,599,000 toneladas de maíz. El país exportó 558,617 toneladas en 2010 e importó 7,848,998 toneladas de maíz.

México produce el 2.72% del maíz en el mundo (en 2010), siendo el cuarto productor a nivel global detrás de Estados Unidos, China y Brasil.

El rendimiento promedio por hectárea es de 3.2 toneladas donde el promedio mundial es 5.2 toneladas por hectárea.

México es el mercado más grande de maíz en el mundo, siendo el 11% del consumo mundial, con un consumo per cápita de 123 kg.

A nivel nacional el grano más producido es el maíz, debido a que constituye la principal fuente de energía para la dieta alimenticia de la población y por otro lado su utilización como forraje de consumo animal.

La producción de maíz ha presentado un alza durante los últimos años y un aumento en el consumo, esto ha llevado a la importación del grano después del TLC para completar la demanda.

Los principales estados productores de maíz son Sinaloa, Jalisco y Estado de México, donde la concentración de zonas productoras del grano está situada en el centro del país.

El maíz, *Zea mays* L. es un grano que pertenece a la familia de las Poáceas-Gramíneas.tribu Maydeas, es la única especie cultiva de este género. Otras especies del género *Zea*, comúnmente llamadas teosinte y las especies del género *Tripsacum*, conocidas como arrocillo, son formas salvajes de *zea mays*. Es la única especie cultiva y con importancia económica, social y alimenticia. Reconocida como planta enteramente doméstica, ya que no crece de forma salvaje y no puede sobrevivir en la naturaleza, tiene además una alta tasa de actividad fotosintética y cuenta con el más alto potencial para la producción de carbohidratos por unidad de superficie por día. Considerado el primer cereal a ser sometido a transformaciones tecnológicas para mejorar su cultivo y siendo un parteaguas en la revolución agrícola, es el segundo cultivo mundial más importante por su producción, después del trigo.

### 2.3.3 Almidón de maíz.

El almidón es la reserva de carbohidratos en el reino de las plantas. Existe como pequeños gránulos depositados en las semillas, tubérculos y tallos de las plantas. A pesar de esto, no todas las plantas son ocupadas por su almidón, sólo un número muy pequeño son producidas comercialmente con este fin. El maíz (*Zea*

*mays* L.) es el mayor recurso para la producción de almidón en el mundo. El almidón de papa y arroz también tiene importante participación global.

Normalmente se obtiene un 66% de almidón del maíz sobre el peso seco de éste, esto hace a la recuperación del almidón un proceso económico, aludiendo al maíz normal que es el de mayor producción. Hay otros tipos de maíz como el *waxy* (*wx*) del que se puede obtener un mayor rendimiento cercano al 90% y el de *alta amilosa* con un rendimiento entre 80 y 90%.

El almidón es almacenado dentro de la planta en gránulos en forma de dos tipos de polímeros conocidos como amilosa y amilopectina. La amilosa es lineal con moléculas de anhidroglucosa conectadas a través de enlaces glucosídicos alfa D (1-4) aunque evidencias prueban la existencia de ramificaciones cortas en D(1-6) en tanto la amilopectina contiene uniones (1-4) y (1-6)-alfa-D-glucosídicos para formar una estructura ramificada. En el maíz y algunas otras plantas, esto es evidencia de que la amilosa y amilopectina influyen en el tamaño de las partículas de almidón.

La utilización del maíz en la industria alimentaria ha aumentado por la aparición de los edulcorantes, jarabes y azúcares basados en maíz. El almidón de maíz es utilizado como ingrediente en la preparación de alimentos, como espesante, modificador de textura, etc. Este almidón también puede ser fermentado para producir alcohol, así como en la industria del papel que es el segundo campo después del alimenticio donde es más requerido. También se utiliza en la industria de la construcción y para el desarrollo de termoplásticos.

El comportamiento de los almidones en los productos está relacionado con su estructura. Químicamente el almidón de maíz se compone de unidades de anhidroglucosa, organizada en dos moléculas estructuralmente distintas, amilosa y amilopectina (Figura 1 y 2) y algunos materiales intermedios que retienen las características de ambas fracciones principales. Parte de la información acerca de

la distribución de estas fracciones dentro de un tipo de almidón se puede obtener a través pruebas químicas básicas.

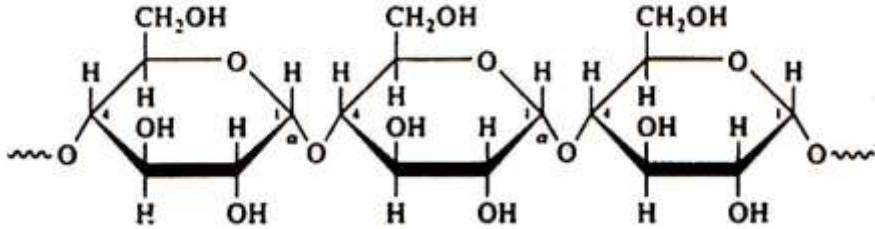


Figura 1: Eslabón de amilosa.

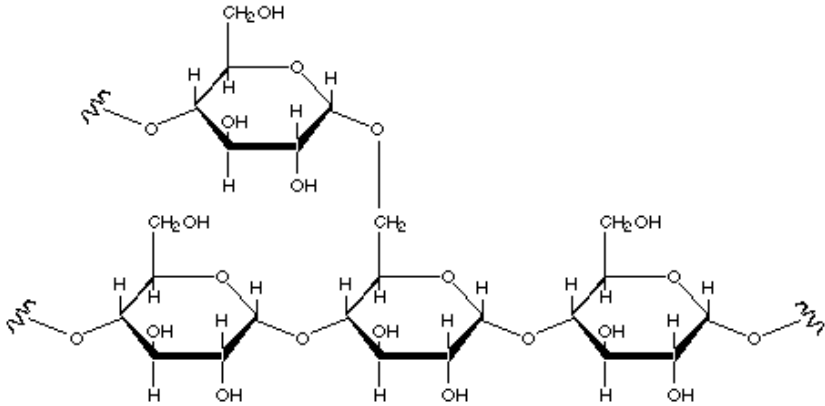


Figura 2: Eslabón de amilopectina.



## 2.4 La Yuca.<sup>14,38,42,43,44,45,46,54</sup>

### 2.4.1 Antecedentes Históricos.

La evidencia más antigua del cultivo de yuca proviene de los datos arqueológicos ya que se cultivó en Perú hace 400 años a. C. y es uno de los primeros cultivos domesticados en América. La siguiente referencia proviene del cultivo de yuca por la cultura maya, hace 1400 años. Otra especie llamada *mandioca esculenta* se originó probablemente más al sur, en Brasil y Paraguay.

En 1511 con la conquista de Cuba por los españoles, estos asimilaron algunas técnicas de los indios taínos, entre ellos el cultivo y procesamiento de la yuca. Para 1960 el desconocimiento que durante años tuvo el mercado mundial sobre los beneficios de la yuca no permitió su cultivo y exportación a países desarrollados. En 2002 la producción mundial de yuca creció considerablemente estimando una producción de 184 millones de toneladas, donde África es el mayor productor.

En los últimos años el desarrollo de variedades de yuca con alto potencial de rendimiento ayuda a mejorar la productividad y la competitividad del cultivo y le permiten entrar en diferentes mercados, especialmente en la industria alimenticia y usos industriales (almidón y adhesivos).

La yuca (*Manihot esculentun Crantz*) pertenece a la familia Euphorbiaceae, es un tubérculo con forma de arbusto muy ramificado con una altura de hasta 3 m. La raíz alcanza desde 8 cm hasta los 90 cm de longitud. La yuca o también llamada mandioca se ha extendido en una amplia área de los trópicos americanos desde Venezuela y Colombia hasta el Noroeste de Brasil, con los tipos de yuca dulce en el norte y los amargos en la zona de Brasil. Las especies silvestres del género *Manihot* tienen dos centros de origen: uno en México y América Central y el otro en el noroeste de Brasil.

Este tubérculo, presenta gran tolerancia a condiciones ambientales extremadamente duras, se puede decir que cuenta con gran adaptación a ecosistemas diferentes, soportando sequias, plagas, plaguicidas y es de fácil almacenamiento bajo tierra.

La yuca es cultivada ampliamente en África tropical, Asia y América Latina, siendo el cuarto cultivo mundial más importante en los países en desarrollo. Es el alimento básico de casi mil millones de personas en 105 países, proporcionando hasta un tercio de las calorías diarias. Sus usos más frecuentes son el consumo humano, en la industria productora de alimentos balanceados para animales, pero el uso más importante en la industria es la elaboración de almidón que es utilizado en las industria alimenticia, textil, fabricación de papel adhesivo entre otros.

#### 2.4.2 Importancia Mundial y en México.

En la siguiente tabla se muestra los distintos indicadores de cultivo en la población mundial del 2012.

<b>Continente</b>	<b>Producción (t)</b>	<b>Sub. Cosechada (Ha)</b>
<b>África</b>	146,217,318.75	13,379,177.82
<b>América</b>	32,503,225.39	2,620,696.77
<b>Asia</b>	77,607,647.60	3,973,975.48
<b>Oceanía</b>	193,173.00	16,706.00

Tabla 1. Cultivo de yuca en la población mundial.

El continente con mayor producción a nivel mundial es África con el 57%, debido a que es de fácil cultivo y duradero a condiciones ambientales extremadamente duras, como la falta de lluvias.

Para la región del continente americano el país que produce la mayor cantidad de yuca es Brasil con el 72% mientras México sólo produce el 0.06%.

En la siguiente tabla se muestran los principales estados productores en México.

<b>Ubicación</b>	<b>Sup. Sembrada (Ha)</b>	<b>Sup. Cosechada (Ha)</b>	<b>Producción (Ton)</b>	<b>Rendimiento (Ton/Ha)</b>	<b>PMR (\$/Ton)</b>	<b>Valor Producción (miles de Pesos)</b>
<b>Guerrero</b>	2	2	17	8.5	6660	113.22
<b>México</b>	2.5	2.5	32.5	13	3900	126.75
<b>Michoacán</b>	109	109	3516	32.26	2544.38	8946.04
<b>Morelos</b>	130.81	130.81	1487.95	11.38	5018.03	7466.58
<b>Tabasco</b>	1203	1203	13033.36	10.83	2489.92	32452.07
<b>Veracruz</b>	40	40	160	4	2580	412.8
<b>Yucatán</b>	28	28	286	10.21	1817.83	519.9
	1515.31	1515.31	18532.81	90.18	25010.16	50037.36

Tabla 2. Principales estados productores de yuca en México.

Se aprecia que la producción total es de 18532.81 toneladas (0.06%)

#### 2.4.3 Almidón de Yuca.

La yuca es la fuente de almidón más barata que existe, siendo utilizada en más de 300 productos industriales.

El almidón de yuca es principalmente producido por la molienda húmeda de sus raíces, aunque en Tailandia se produce con los trozos de yuca seca. Es utilizado primordialmente en las cocinas e industrias alimenticias. En menor escala la fécula se utiliza en las industrias químicas y farmacéuticas.

Los principales exportadores de almidón de yuca son Tailandia, Vietnam, Indonesia y Hong Kong.

El almidón de yuca es utilizado en la industria alimentaria como ligante de agua, coadyuvante de emulsificantes, fuente de carbohidratos, espesantes y agente de textura.

#### 2.4.3.1 Proceso de obtención.

La extracción del almidón de la yuca se puede realizar en plantas artesanales o en plantas más tecnificadas; sin embargo, el proceso en esencia es el mismo. Comienza con la descarga de la materia prima cerca de donde se realiza el lavado y pelado, donde es suministrado en la tolva alimentadora para ser macerada finamente por medio de la superficie cortante, convirtiéndola en una pasta de ralladura de yuca donde el almidón se encuentra en disolución. El agua y almidón son separados y se hacen pasar por un tamiz con malla para retener impurezas. El agua y el almidón son separados por canales de sedimentación.

<b>Especie</b>	<b>Tipo de Almidón</b>	<b>Contenido de Almidón (%)</b>	<b>Contenido de amilosa (%)</b>
<b>Maíz</b>	Cereal	64-78	22-28
<b>Sorgo</b>	Cereal	60-77	22-25
<b>Arroz</b>	Cereal	87-93	0-28
<b>Trigo</b>	Cereal	55-78	17-27
<b>Papa</b>	Tubérculo	8 -29	22
<b>Yuca</b>	Tubérculo	11	16.5-22

Tabla 3. Contenido de almidón y amilosa de algunos cereales y tubérculos.<sup>59</sup>

## 2.5 Plastificantes y Aditivos.<sup>3,4,25,40</sup>

### 2.5.1 Plastificantes

Son generalmente pequeñas moléculas tales como los polioles como el sorbitol, glicerina y polietilenglicol (PEG) que se intercalan entre cadenas de polímeros. Esto altera, en los polímeros, los enlaces de hidrógeno, la expansión de las cadenas poliméricas, la flexibilidad, y disminuye la permeabilidad al vapor de agua y distintos gases.

Muchos polímeros comerciales, tales como materiales celulósicos, acrílicos, vinilos y los TPS tienen temperaturas de transición vítrea ( $T_g$ ), por encima de la temperatura ambiente. Por ello, la función principal de un plastificante es reducir la  $T_g$  de un polímero a fin de aumentar su flexibilidad respecto a las temperaturas esperadas de aplicación.

Los plastificantes trabajan introduciéndose entre las cadenas de polímeros espaciándolas, descendiendo así de forma significativa la temperatura de transición vítrea. Los plastificantes tienen por lo general un punto de ebullición alto y son líquidos orgánicos o sólidos con punto de fusión bajo. También son en ocasiones polímeros con peso molecular moderado. Como los disolventes ordinarios, estos actúan a varios grados de acción de solvatación en el polímero.

Las moléculas de plastificante se insertan entre las moléculas de polímero empujándolas y separándolas entre sí. Esto reduce la intensidad de las fuerzas intermoleculares de cohesión. El funcionamiento de estos también puede depender de la atracción polar intermolecular entre el plastificante y las moléculas de polímero, ya que anula eficazmente las interacciones dipolo - dipolo entre las moléculas de polímero. Como resultado, la plastificación es difícil de lograr en polímeros no polares tales como poliolefinas y polímeros altamente cristalinos.

La plastificación de los polímeros se puede lograr ya sea a través de la incorporación interna o externa de los plastificantes.

La plastificación interna implica la copolimerización de los monómeros del polímero deseado y la del plastificante de modo que el plastificante es una parte integral de la cadena del polímero. En este caso, el plastificante es generalmente un polímero con una baja Tg. Los monómeros plastificantes más ampliamente utilizados son el acetato de vinilo y cloruro de vinilideno.

Los plastificantes externos son los incorporados como un aditivo externo de bajo peso molecular. Los más típicos para este tipo de plastificación son ésteres formados a partir de la reacción de ácidos o anhídridos de ácidos con alcoholes.

En el presente trabajo se utilizaron sorbitol, glicerina y PEG 4000 como plastificantes, debido a que en distintas publicaciones se han reconocidos sus buenas propiedades de plastificación, ser amigables con el ambiente y no tener un alto costo.

#### 2.5.1.1 Agua Destilada

Es una molécula polar con un átomo de oxígeno y dos de hidrógenos unidos por puentes de hidrógeno ( $H_2O$ ). El oxígeno es más electronegativo que el hidrogeno y atrae con más fuerza a los electrones de los enlaces covalentes y esto le da una distribución asimétrica de electrones lo que la vuelve polar, con un ángulo entre enlaces de  $104.5^\circ$  como se muestra en la Figura 3.

El agua destilada está libre de iones e impurezas que pueden afectar las reacciones, esto es aprovechado por la industria y la investigación.

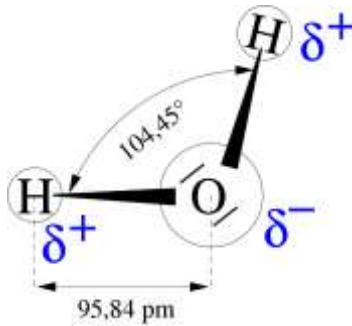


Figura 3. Molécula de Agua

También es empleada como plastificante ya que desestructura al almidón en la elaboración de almidones termoplásticos (TPS).

Es el plastificante más económico y en este trabajo fue empleado también para mejorar y facilitar el mezclado, además que la cantidad empleada en el mezclado afecta las propiedades mecánicas de los termoplásticos (TPS) y su procesamiento.

#### 2.5.1.2 Sorbitol. ( $C_6H_{14}O_6$ ).

Llamado comúnmente sorbita, es obtenido por reducción del monosacárido más común, la glucosa.

Es un plastificante que se utiliza en la industria como humectante para mantener diversos productos con un grado de humedad apropiado; se utiliza en la elaboración de alimentos como edulcorante, fármacos, acondicionador textil y demás productos químicos.

Al añadir este plastificante a mezclas se logra un ligero incremento en la resistencia a la tracción de las muestras. Este incremento es mayor mientras la proporción en peso del plastificante aumente, aunque decrecen ligeramente las características elásticas de la mezcla.

Como plastificante en almidones, el sorbitol presenta un mayor efecto en la estructura del almidón que la glicerina pero es necesario disolver el sorbitol, ya que se encuentra en estado sólido.

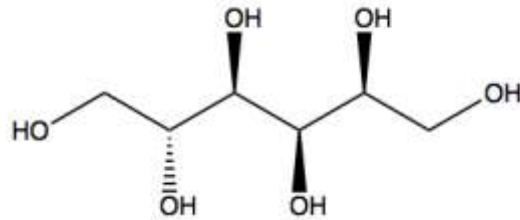


Figura 4. Molécula de sorbitol

#### 2.5.1.3 Polietilenglicol (PEG).

El polietilenglicol es un polímero que se obtiene de la reacción entre el óxido de etileno y el agua. Es muy soluble en agua y prácticamente insoluble en alcohol, en éter, aceites grasos y minerales. Presenta un grado muy bajo de toxicidad.

Es comúnmente utilizado en diversas reacciones químicas como inerte, como disolvente no volátil así como catalizador o reactivo. En la medicina es empleado como antiagregante y laxante.

Su fórmula molecular es  $C_{2n+2}H_{4n+6}O_{n+2}$ . Su bajo peso molecular le proporciona características para ser un buen plastificante mejorando la flexibilidad de los almidones termoplásticos

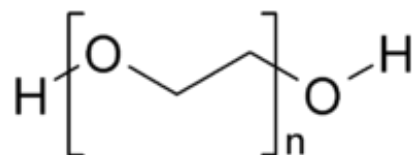


Figura 5. Eslabón de PEG



### 2.5.2 Aditivos.

Muy pocos polímeros se utilizan tecnológicamente en su forma químicamente pura, es necesario modificar su comportamiento y algunas de sus características con la incorporación de aditivos.

Los aditivos suelen ser necesarios para añadir estabilidad frente a los efectos degradantes de los diversos tipos de procesos de envejecimiento, así como mejorar la calidad y el rendimiento del producto. De esta manera muchos polímeros deben incorporar estabilizadores térmicos y de luz, antioxidantes, retardantes de llama, entre otros.

Además de agregar aditivos que influyen en la interacción química de los polímeros con el ambiente, existen otros aditivos que se emplean para reducir los costos, mejorar las cualidades estéticas o modificar el procesamiento, comportamiento mecánico de un polímero. Tales aditivos incluyen plastificantes, lubricantes, modificadores de impacto, agentes antiestáticos, pigmentos, y tintes. Estos aditivos se utilizan normalmente en cantidades relativamente pequeñas menores al 3% de la mezcla total, sin embargo, los rellenos no reforzantes se emplean en grandes cantidades para reducir los costos generales de formulación, siempre que ello no dé lugar a una reducción significativa o indeseable en la calidad del producto o el desempeño del material.

En algunos casos, un polímero dado puede todavía no cumplir los requisitos de una aplicación específica, incluso con la incorporación de aditivos. En tales casos, el objetivo deseado puede alcanzarse a través de la formación de la aleación o mezcla de dos o más polímeros llamados composites.

### 2.5.2.1 Ácido cítrico<sup>1, 28,34,37,48,49</sup>

Es un producto natural que fue aislado del jugo de limón por primera vez y está presente como componente en muchas frutas cítricas. En la actualidad es el ácido orgánico más importante producido por fermentación fúngica, es posible hacerlo por síntesis química pero es más costoso. La producción en 2004 fue cercana a 1.4 millones de toneladas estimadas por la *Business Communications Co.*, en un estudio de mercado de productos químicos producidos por fermentación.

Existe un crecimiento en la demanda de este compuesto debido a su baja toxicidad y empleo en la industria de alimentos y bebidas como saborizante, produciéndose principalmente en Europa occidental y Norteamérica. A mostrado un crecimiento considerable en Asia específicamente en China donde las industrias han bajado los precios, lo que ha significado un duro golpe a los proveedores europeos de ácido cítrico.

El ácido cítrico también se puede encontrar en la leche y en pequeñas cantidades en sangre y orina.

Algunas propiedades del ácido cítrico es su cristalización en las disoluciones acuosas, es fácilmente soluble en agua; funde a 153 °C. También es ocupado para disminuir el pH en el procesamiento de los TPS.

En el aire se puede encontrar en forma de partículas, éstas son eliminadas de la atmosfera por precipitación húmeda y seca. En el suelo se presenta principalmente en forma de anión. Puede ser biodegradado fácilmente en el suelo y agua. En los cuerpos de agua no se adsorbe a los sólidos suspendidos y sedimentados. Es un componente del metabolismo de los carbohidratos en los seres vivos.

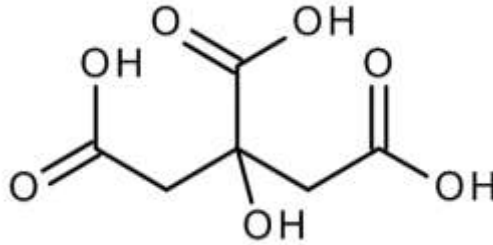


Figura 6. Molécula de ácido cítrico

#### 2.5.2.2 Urea.<sup>30,36,50</sup>

También conocida por carbamida y con fórmula química  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ , es un sólido cristalino, altamente soluble en agua, inodoro, incoloro y prácticamente no tóxico. Es mayormente recordado por ser el producto final mayoritario del metabolismo del nitrógeno proteico en los seres humanos y los animales; en estos últimos también se puede encontrar en la sangre orina y sudor.

Es de gran importancia en la industria agrícola para enriquecer de nitrógeno a los fertilizantes debido a la gran cantidad que contiene. Industrialmente es producido a partir de amoníaco y dióxido de carbono por un proceso llamado Bosch-Meiser.

La urea se emplea para evitar la retrogradación del almidón, sin embargo la urea tiene poca flexibilidad interna y esto otorgar cierto grado rigidez.

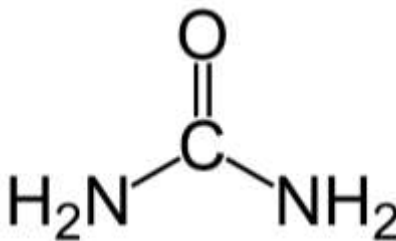


Figura 7. Molécula de Urea.

### 2.5.2.3 Cloruro de Sodio.<sup>58</sup>

El cloruro de sodio, con formula química NaCl, o sal de mesa fue uno de los primeros nutrientes identificados como esencial para la vida. El agua de mar contiene 2.68%. Para algunos animales se encuentra en exceso en su ambiente y para otros es difícil obtenerla para su dieta.

El punto de fusión del cloruro de sodio es bastante alto (810°C) es un compuesto iónico y es soluble en agua.

El sodio se presenta en forma de minerales de silicatos como la albita ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ) Durante periodos largos a escala geológica, el viento y la lluvia descomponen los silicatos, convirtiendo los iones de sodio en compuestos más solubles. La lluvia extrae los compuestos del suelo y los lleva hasta el mar.

El cloruro de sodio, como la mayoría de las sales iónicas, confiere propiedades coligativas a sus disoluciones, es decir, es capaz de variar la presión de vapor de la disolución, elevar el punto de ebullición y descender el punto de congelación según su concentración molar. En este caso el cloruro de sodio mejora la resistencia de los termoplásticos debido a sus enlaces iónicos. La presencia de grandes concentraciones disminuye la temperatura de gelatinización.

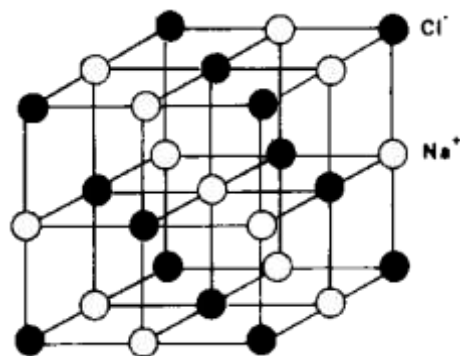


Figura 8. Molécula de la cloruro de sodio

#### 2.5.2.4 Negro de Humo.<sup>33</sup>

En términos simples el negro de humo es carbono en forma de partículas extremadamente finas que tienen una estructura molecular amorfa, dentro de la masa amorfa hay una infraestructura de arreglos microcristalinos de anillos condensados.

Cuando aparecen los anillos condensados en arreglos similares a capas se le llama grafito.

La orientación de los arreglos dentro de la masa amorfa arroja una gran área en la partícula, asociado a esto hay un gran número de enlaces de carbono incompletos que proveen sitios para actividad química.

El negro de humo es un término genérico para este producto indispensable para diversas industrias como las de cauchos, pinturas y tintas ya que funciona como reforzante, agente conductor o estabilizante a los rayos UV y es el nanomaterial más utilizado.

Es producido por la incompleta combustión o descomposición térmica de gases e hidrocarburos líquidos entre ellos madera, brea y fracciones pesadas de petróleo bajo condiciones controladas. El tamaño promedio de partículas del negro de humo comercialmente disponible es de 10 a 500 nanómetros

La distribución de las partículas influye en las propiedades que otorgara en el caso de ser un reforzante en los cauchos.

Es utilizado para otorgarle coloración y mayor resistencia a los rayos UV en los TPS.

## 2.6 Almidones Termoplásticos.

Algunos aspectos importantes para la obtención de los TPS son:

- Gelatinización.
- Extrusión.

### 2.6.1 Gelatinización.

Los gránulos de almidón a temperatura ambiente no son solubles pero a altas temperaturas pueden retener cantidades grandes de agua; este proceso es denominado gelatinización. Durante la gelatinización se produce la lixiviación de la amilosa, esto ocurre en un intervalo regularmente amplio de temperatura, donde los gránulos más grandes son los que primero gelatinizan. Se genera una pasta en la que existen cadenas de amilosa de bajo peso molecular altamente hidratadas que rodean a los agregados también hidratados y al resto de los gránulos sin hidratar.

Las características de gelatinización de un almidón son importantes para su utilización. Existen diversos factores que afectan a la gelatinización y las propiedades resultantes. Por ejemplo, partículas extremadamente hinchadas pueden romperse, colapsarse y fragmentarse causando una disminución de la viscosidad, especialmente si existe un exceso de agitación de la mezcla. Se debe tener cuidado para evitar sobremanipular el sistema hidratado.

Cuando se ha gelatinizado el almidón de maíz, al igual que la mayoría de los almidones de cereales, se espesa para formar una estructura similar a un gel tras el enfriamiento. Los almidones gelatinizados de las raíces o tubérculos, como la papa y tapioca, no llegan a ser muy viscosos tras el enfriamiento sino que forman un coloide con bordes no definidos, en lugar de un gel organizado. Además, los

almidones de raíces tienden a mantener una mayor claridad después del enfriamiento que los almidones de cereales.<sup>1</sup>

### 2.6.2 Extrusión.<sup>3</sup>

Para la fabricación de piezas de plástico existen diferentes métodos de conformación, en base a las características de los materiales, geometría y propiedades físicas. La extrusión es una de las técnicas más utilizadas para obtener piezas largas con sección transversal uniforme, ya sean hilos, varillas, perfiles o tubos.

En el proceso de extrusión se introduce un polímero termoplástico viscoso en la tolva de alimentación del extrusor. Es forzado a pasar continuamente, en estado fluido, a través de un husillo.

El husillo desempeña una multitud de funciones, pero principalmente se encarga de transportar, fundir y homogeneizar el plástico. Estas funciones se logran mediante la aplicación de presión y calor.

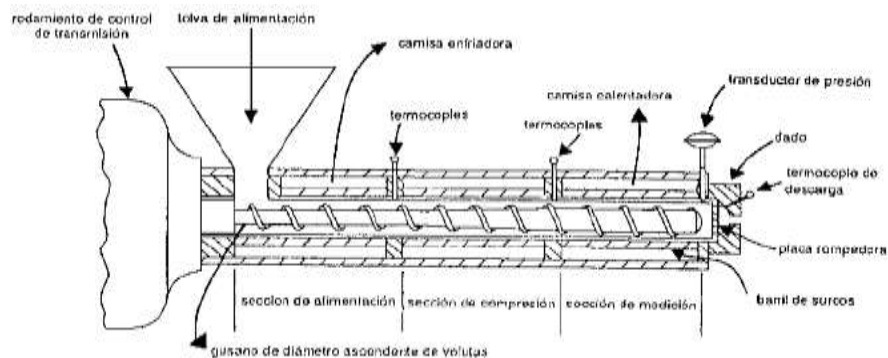


Figura 9. Corte transversal de un extrusor de un solo gusano.<sup>60</sup>

Con este equipo se pueden obtener condiciones como las siguientes:

- Permitir un transporte constante
- Producir una masa fundida y mecánicamente homogénea

- Permite la transformación del material por debajo de su límite de degradación térmica, química o mecánica.

#### 2.6.2.1 Parámetros de Procesado.

Para obtener un almidón termoplástico óptimo es necesario conocer cómo influyen los parámetros de procesado durante la mezcla. Los factores a determinar en el proceso son: temperatura, torque, tiempo de residencia y proporción de los plastificantes y aditivos añadidos. La manipulación de estas variables repercute en las propiedades del almidón termoplástico fabricado.

Algunos ejemplos de cómo influyen estos factores se presentan a continuación.

Un aumento en la velocidad de rotación del husillo implica un producto final más flexible. Cuando se aumenta el contenido de almidón y se disminuye el contenido de los plastificantes, la mezcla se hace más viscosa. Este aumento sugiere un mayor consumo de energía durante el proceso y provoca mezclas más difíciles de procesar y menos flexibles.



## 2.7 Caracterización.<sup>17</sup>

### 2.7.1 Módulo de Young.<sup>2,3,20,53,57</sup>

Las pruebas mecánicas son indispensables para caracterizar cualquier plástico sintético o biodegradable. El desarrollo de éstas se basan en diversas normas y recomendaciones, tales como ASTM D 638 y ASTM D1708 entre otras.

El módulo de Young, que se describe como la razón entre el incremento de esfuerzo y el cambio correspondiente a la deformación unitaria. El esfuerzo puede representarse en una tensión o una compresión, denominando a esto el módulo de Young, siendo una constante independiente del esfuerzo, siempre que no exceda de un valor máximo denominado límite elástico. Tanto el módulo de Young como el límite elástico son distintos para los diversos materiales.

Para un material elástico lineal el módulo de elasticidad longitudinal es una constante que se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

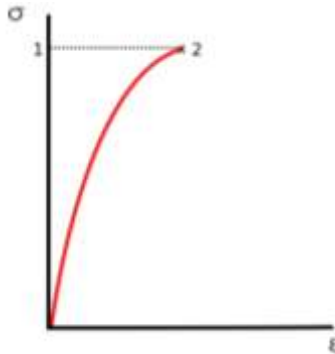


Figura 10. Representación del Módulo de Young.

Donde:

E: Módulo de elasticidad longitudinal

$\sigma$ : Esfuerzo normal sobre el área de sección transversal

$\epsilon$ : Deformación unitaria en cualquier punto de la barra.

Es indispensable conocer que la deformación unitaria ( $\epsilon$ ) es directamente proporcional al tiempo.

Para determinar la esfuerzo normal ( $\sigma$ ) y la deformación unitaria ( $\epsilon$ ) se utilizan equipos que determinen la elongación de las muestras como el registro del tiempo y la fuerza utilizada en cada prueba.

### 2.7.2 Microscopia electrónica de barrido (SEM).<sup>7,8,51</sup>

Esta técnica es una de las más versátiles en el estudio y análisis de las características microestructurales de los materiales. Con esta técnica se puede observar estructuras importantes en tres dimensiones a diferencia de la microscopia electrónica de transmisión (TEM). Además que en esta última técnica la muestra debe tener un espesor considerablemente delgado para ser transparente al haz de electrones.

La microscopia electrónica puede arrojar información importante sobre la morfología, cristalografía, composición, potencial eléctrico, campo magnético, etcétera.

El funcionamiento de este microscopio electrónico de barrido es hacer incidir un haz de electrones con energía entre 1 y 50 keV y en un vacío de  $10^{-7}$  bar sobre la muestra opaca a los electrones. El haz es focalizado sobre la superficie de la

muestra describiendo líneas paralelas. Como resultado de esta interacción entre el haz y la muestra suceden diversos fenómenos siendo los de mayor interés: la emisión de electrones secundarios y la reflexión de los electrones primarios que dan lugar a un haz de electrones retrodispersados de alta energía. La intensidad de este haz depende de la superficie de la muestra. Seguido la corriente eléctrica de la muestra se recolecta y amplifica; las variaciones de la intensidad mientras el haz incidente barre la muestra se utilizan para variar la intensidad de la traza en un tubo de rayos catódicos que barren en sincronía con la sonda.

El cambio en el aumento de la imagen se consigue variando el tamaño del área barrida en la muestra, manteniendo constantes las dimensiones de la imagen en pantalla.

### 2.7.3 Espectroscopia Infrarroja.<sup>2, 4, 5,6 ,29,32</sup>

También conocida como espectroscopia infrarroja es una de las más importantes técnicas de espectroscopia utilizada en las ciencias químicas. Básicamente es la medición de la absorción de diferentes frecuencias de infrarrojo para una muestra posicionada en la trayectoria del haz infrarrojo.

Toda la materia contiene moléculas y éstas tienen enlaces que están continuamente vibrando y moviéndose. Estos enlaces pueden vibrar con movimientos de flexionamiento o estiramiento. Una molécula con tres o más átomos puede experimentar una flexión o vibración provocando que el ángulo entre sus átomos cambia.

Se alcanza cada estado vibracional excitado cuando la molécula es expuesta a una frecuencia específica. Para que cada enlace pueda ser llevado del estado fundamental al excitado debe ser sometido al mismo nivel de energía, es decir, la diferencia entre la energía del estado fundamental y el excitado.

Al determinar las frecuencias y representarlas permite determinar los enlaces que existen en una molécula. Dichas frecuencias se encuentran dentro de la región del infrarrojo.

Con el espectrofotómetro IR se hace pasar la radiación infrarroja a través de la muestra de un compuesto desconocido y usa un detector para trazar el porcentaje de transmisión de la radiación a través de la molécula en comparación con el número de onda de la radiación. Un pico hacia abajo en el gráfico representa la absorción a un número de onda específica

La espectroscopia IR es útil en la determinación de la estructura química, porque la energía para los estados vibracionales corresponde a valores específicos, esto permite identificar a los grupos funcionales presentes en una molécula y observar cambios en las estructuras de los compuestos utilizados en el procesado de muestras.

#### 2.7.4 Calorimetría diferencial de barrido.<sup>16</sup>

El análisis térmico tiene un papel muy importante en la caracterización de materiales termoestables y abarca un gran número de técnicas de medición en las que se registra la respuesta del material al calentado o al enfriamiento.

La variable dependiente suele ser la temperatura pero también puede ser el tiempo. Una de estas técnicas es la calorimetría diferencial de barrido.

La calorimetría diferencial de barrido mundialmente conocida por sus siglas en inglés DSC (Differential scanning calorimetry) es probablemente la herramienta más empleada para determinar propiedades térmicas y transiciones de los materiales termoestables y TPS.

Esta técnica mide la diferencia de calor necesaria para mantener el incremento de temperatura con una  $\Delta T=0$  entre la muestra y la referencia. Cuando la muestra experimenta una transformación física se necesitará que fluya más o menos calor endotérmicamente o exotérmicamente, para mantener ambas a la misma temperatura registrando los intervalos de temperatura en los que ocurren las transformaciones.

La Capacidad calorífica, conductividad térmica, la temperatura de transición vítrea, así como algunos procesos termodinámicos como la cristalización y fusión pueden ser detectadas a través de la DSC

#### 2.7.4.1 Temperatura de Transición Vitrea. ( $T_g$ )

Una muestra dada de polímero se compone de una mezcla de moléculas que tienen diferentes longitudes de cadenas poliméricas (pesos moleculares) en contraste con las moléculas simples. Es por esto que la transición entre la fase sólida y líquida de un polímero es difusa y se produce en un intervalo de temperatura cuya magnitud (del orden de 2 a 10 ° C) depende de la polidispersidad del polímero. Los polímeros en su fundición se vuelven fluidos muy viscosos a diferencia de materiales de bajo peso molecular.

El movimiento molecular, en una muestra de polímero, es promovido por su energía térmica. Ésta se opone a las fuerzas de cohesión entre los segmentos estructurales (grupos de átomos) a lo largo de la cadena y entre las cadenas vecinas. Por consiguiente, las transiciones térmicas en polímeros dependen de la estructura del polímero.

La transición desde el cristal duro y quebradizo a un estado de goma más blanda se produce en un intervalo de temperatura que se conoce como la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ). En el caso de un polímero parcialmente cristalino, la transformación anterior se produce sólo en las regiones amorfas.

La naturaleza fundamental de la transición vítrea no está aún clara. Es un proceso complejo que implica el equilibrio termodinámico y factores cinéticos. Las diversas teorías de la transición vítrea han utilizado ya sea el enfoque termodinámico o el cinético. La aproximación termodinámica se basa en consideraciones de la entropía del estado vítreo, mientras que la teoría cinética considera los fenómenos de relajación asociados a la transición. Cada enfoque da sólo una explicación parcial para el comportamiento observado de los polímeros.

#### 2.7.4.2 Temperatura de Fusión ( $T_m$ )

También llamado punto de fusión de equilibrio cristalino ( $T_m$ ), para los polímeros corresponde a la temperatura a la que el último de los cristales comienza a derretirse. En contraste con los materiales simples, el valor de  $T_m$  depende del grado de cristalinidad y la distribución del tamaño de los cristales.

#### 2.7.4.3 Temperatura de Descomposición. ( $T_D$ )

Las transiciones en polímeros son complejas ya que estas moléculas son suficientemente grandes y no existen en estado gaseoso y cuando son sometidos a altas temperaturas, los enlaces covalentes de las cadenas poliméricas pueden destruirse y el polímero se quema o se carboniza. Esta temperatura, denominada temperatura de descomposición, limita la utilidad del polímero y representa la temperatura superior a la cual el polímero puede ser conformado de manera útil

## 2.8 Diseño de experimentos, Método Taguchi.<sup>31,35</sup>

El diseño de experimentos se refiere al proceso de planificación, diseño y análisis de la experimentación, todo esto valida las conclusiones y su elaboración eficiente. Es necesario integrar métodos estadísticos sencillos y poderosos en el diseño de la metodología ya que el éxito de cualquier diseño depende de la sólida planeación, la correcta elección del diseño experimental, el análisis estadístico de los datos y el trabajo en equipo.

Existen diversos métodos para el diseño de experimentos, uno de ellos es el método Taguchi para el diseño de experimentos robustos. Este método fue desarrollado por el doctor japonés Taguchi Genichi con el fin de investigar como diferentes parámetros afectan a la media y varianza del funcionamiento característico de un proceso, esto define que tan bien el proceso está funcionando.

El diseño experimental propuesto por Taguchi requiere el uso de matrices ortogonales para organizar las variables o parámetros que afectan el proceso y los niveles en los que varían. Así, en lugar de probar todas las combinaciones posibles como en el diseño factorial, el método Taguchi prueba sólo pares de combinaciones, esto permite la recopilación de datos necesarios para reconocer cuáles factores afectan en mayor medida la calidad del producto y la interacción entre estos parámetros.

Debido a que este método tiene como puntos principales mejorar la calidad de los productos, disminuir la cantidad de experimentaciones a realizar en los diseños robustos, reducir los costos de manufactura, los tiempos y recursos es un método ampliamente utilizado en la industria.

En general las matrices en el método Taguchi se pueden seleccionar dependiendo del número de parámetros (variables por ejemplo: A,B,C...etcétera.) y el número de niveles (por ejemplo: alto, medio ,bajo).

Experiment	P1	P2	P3	P4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Figura 11. Ejemplo de acomodo ortogonal Método Taguchi.

El método Taguchi se puede utilizar para seleccionar nuevos valores de los parámetros a optimizar en el proceso, ya que los datos de las matrices pueden ser analizados gráfica y estadísticamente



### 3. Experimentación.

El presente proyecto se realizó en el Departamento de Ingeniería Química, Laboratorio de Polímeros L-324 Edificio D, Facultad de Química de la UNAM. El desarrollo se llevó a cabo en dos etapas:

1. Experimentación y selección de condiciones de procesamiento para los TPS
2. Obtención y caracterización de TPS.

3.1 Parte Experimental 1 .Experimentación y selección de condiciones de procesamiento para TPS.

#### 3.1.1 Sustancias y Equipos

Sustancias:

- Almidón de maíz Meelunie<sup>®</sup> (10.7% humedad, grasa 0.2 % max. y proteína 0.5% max.).
- Almidón de yuca Meelunie<sup>®</sup> (7.3% humedad, pH: 5.0-7.0, blancura de 90% min y almidón 85 % min).
- Sorbitol (98% p/p)
- Glicerina (75% p/p)
- Polietilenglicol 4000
- Agua destilada

Equipos:

- Extrusora CSI Customs Scientific Instruments Mixing Extruder Modelo CS194 A.
- Balanza Sartorius modelo BP 310P

- Parrilla de Calentamiento con Agitación Magnética Marca Thermolyne.
- Horno SL Shell Lab. Modelo CE3G

### 3.1.2 Metodología

El desarrollo de la etapa I fue la preparación de mezclas entre los almidones y plastificantes seleccionados en agua. Para la obtención de las mezclas se utilizaron almidones de maíz y yuca, así como sorbitol, glicerina y polietilenglicol respectivamente. A continuación se muestra un diagrama de árbol con las mezclas realizadas.

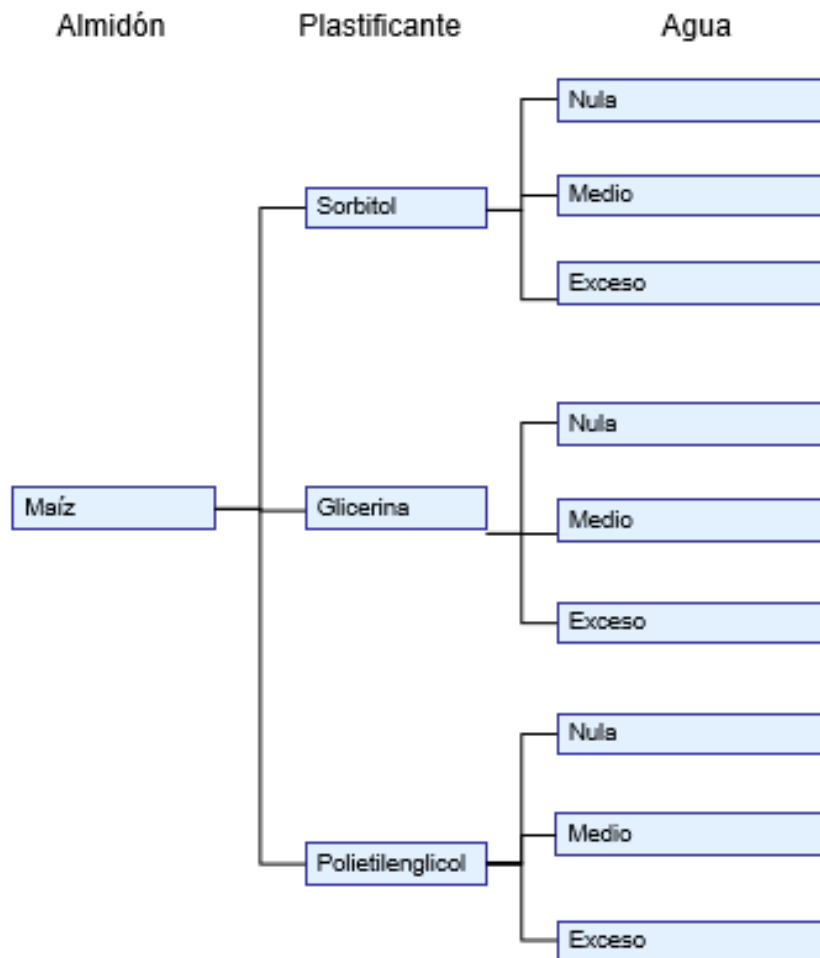


Figura 12. Selección de condiciones de mezclado.

### 3.1.3 Procedimiento Experimental.

#### 3.1.3.1 Diagrama de Flujo.

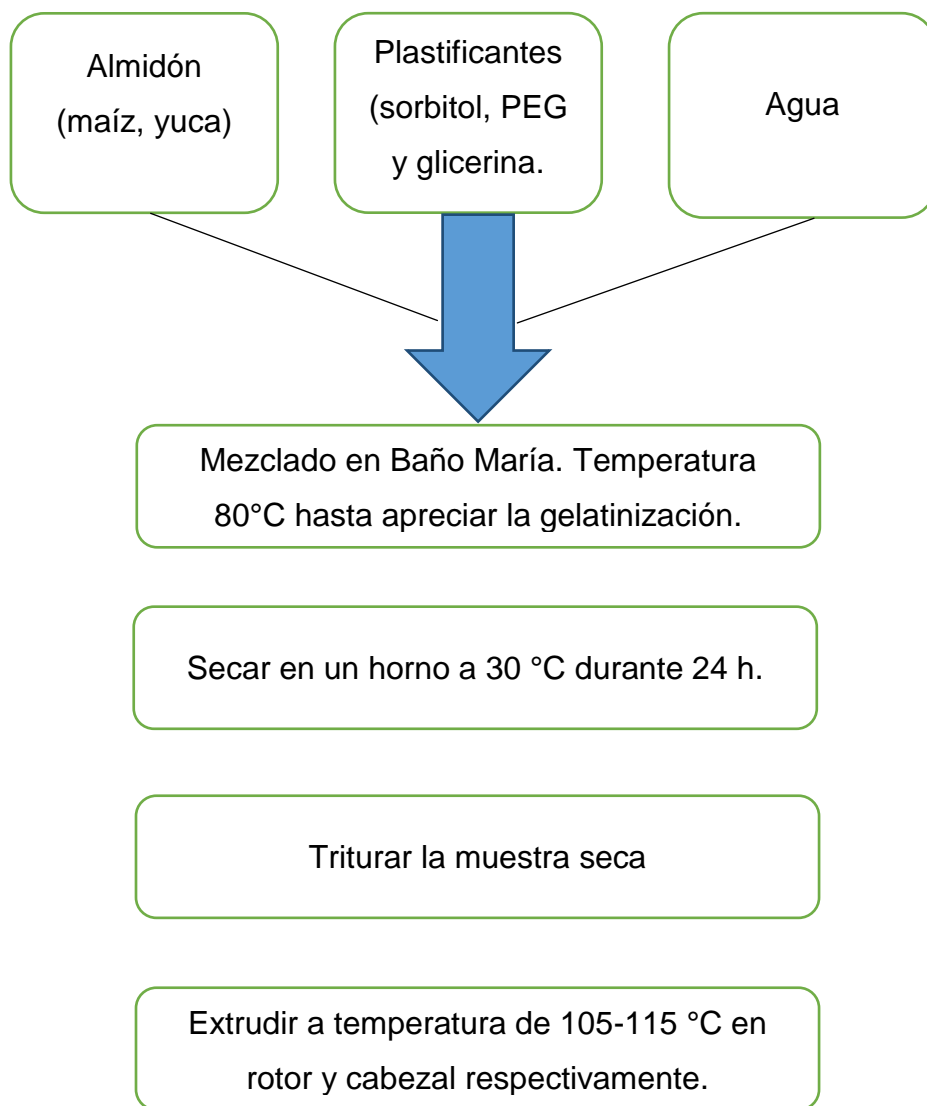


Figura 13. Diagrama de experimentación para la selección de condiciones de procesamiento.

### 3.1.3.2 Preparación.

A continuación se ejemplifican los dos tipos de preparación, aplicables para cada almidón:

1. Pesar 4 gramos de almidón de maíz.
2. Pesar 1 gramo de sorbitol.
3. Mezclar el almidón de maíz y sorbitol y agregar 5 mL de agua destilada.
4. Colocar la mezcla en baño María, a una temperatura de 80 °C y agitación electromagnética continua.
5. Detener el calentamiento cuando se aprecie visualmente la gelatinización.
6. Llevar a secado en un horno a 30 °C, durante 24 h.
7. Triturar la muestra seca.
8. Extrudir a una temperatura de 105-115 °C en rotor y cabezal respectivamente.

### 3.1.3.3 Condiciones de procesamiento por muestra.

Muestra	Almidón (g)	Sorbitol	Glicerina (mL)	PEG (g)	Agua (mL)	Temperatura de Extrusión (°C)
ATMS 101	4	1	-	-	0	105-115
ATMS 102	4	1	-	-	5	105-115
ATMS 103	4	1	-	-	10	105-115
ATMG 101	4	-	0.8	-	0	105-115
ATMG 102	4	-	0.8	-	5	105-115
ATMG 103	4	-	0.8	-	10	105-115
ATMP 101	4	-	-	1	0	105-115
ATMP 102	4	-	-	1	5	105-115
ATMP 103	4	-	-	1	10	105-115

Tabla 4. Especificaciones y condiciones de procesamiento.

## 3.2 Parte Experimental 2: Obtención y caracterización de TPS.

### 3.2.1 Sustancias y Equipo

#### Sustancias:

- Almidón de maíz Meelunie<sup>®</sup> (10.7% humedad, grasa 0.2 % max. y proteína 0.5% max.).
- Almidón de yuca Meelunie<sup>®</sup> (7.3% humedad, pH: 5.0-7.0, blancura de 90% min y almidón 85 % min).
- Sorbitol (98% p/p).
- Glicerina (75% p/p).
- NaCl pura.
- Agua pestilada.
- Urea.
- Ácido cítrico.

#### Equipo:

- Extrusora CSI Customs Scientific Instruments Mixing Extruder Modelo CS194 A.
- Balanza Sartorius modelo BP 310P
- Parrilla de Calentamiento con Agitación Magnética Marca Thermolyne.
- Prensa Freds Carver Inc. Modelo 2697
- Horno SL Shell Lab. Modelo CE3G

### 3.2.2 Diseño Experimental.

El diseño de experimentos se basó en el método Taguchi, desarrollando dos niveles y cuatro variables, obteniendo las siguientes mezclas:

Muestra	Sorbitol/Almidón (%)	Temperatura (°C)	NaCl	Ácido Cítrico
SATM101	+	+	+	+
SATM102	+	+	+	-
SATM103	+	+	-	+
SATM104	+	-	-	-
SATM105	+	-	+	+
SATM106	+	-	+	-
SATM107	-	+	-	+
SATM108	-	+	-	-
SATM109	-	+	+	+
SATM110	-	-	+	-
SATM111	-	-	-	+
SATM112	-	-	-	-

Tabla 5. Diseño experimental para el almidón de maíz.

Muestra	Sorbitol/Almidón (%)	Temperatura (°C)	NaCl	Ácido Cítrico
SATY101	+	+	+	+
SATY102	+	+	+	-
SATY103	+	+	-	+
SATY104	+	-	-	-
SATY105	+	-	+	+
SATY106	+	-	+	-
SATY107	-	+	-	+
SATY108	-	+	-	-
SATY109	-	+	+	+
SATY110	-	-	+	-
SATY111	-	-	-	+
SATY112	-	-	-	-

Tabla 6. Diseño experimental para el almidón de yuca

Donde:

Nivel bajo (-) 20/74 % y alto (+) 27/71 % para sorbitol/almidón.

Nivel bajo (-) 105-115 °C y- alto (+) 115/125 °C en rotor y cabezal respectivamente para temperatura.

Nivel bajo (-) 2% y alto (+) 5% para cloruro de sodio (NaCl)

Nivel bajo (-) 0% y alto (+) 1% para ácido xítrico.





### 3.2.3.2 Preparación

#### Muestra SATM101

1. Pesar 4 g de sorbitol, 14.8 g de almidón de maíz, 1 g de NaCl pura, 0.6 g de Ácido Cítrico y 0.2 g de Urea.
2. Mezclar los componentes antes pesados y agregar 50 mL de agua destilada. Agitación magnética hasta obtener una mezcla homogénea.
3. Colocar la mezcla en baño María, a una temperatura de 80 °C, manteniendo una agitación Constante. Detener el calentamiento cuando visualmente se aprecie la gelatinización.
4. Llevar a secado en un horno a 30 °C, para después triturar la muestra seca.
5. Extrudir a una temperatura de 115-125 °C en rotor y cabezal respectivamente. Retirar perfiles, para posteriormente cortarlos en pequeños pellets de 3 mm de diámetro por 5mm de largo.
6. Prensar 8 gramos de fragmentos a una temperatura de 115 °C, en un molde rectangular de 10 mm de largo por 5 mm de ancho por 1 mm de espesor, durante 10 minutos.

### 3.2.3.3. Condiciones de Procesamiento por muestra.

Almidón de Maíz							
Muestra	Almidón (g)	Sorbitol (g)	NaCl (g)	Urea (g)	Ácido Cítrico (g)	Agua (mL)	Temperatura de Extrusión Rotor/cabezal(°C)
SATM101	14.8	4	1	0.2	0.6	50	115-125
SATM102	14.8	4	1	0.2	0	50	115-125
SATM103	15.4	4	0.4	0.2	0.6	50	115-125
SATM104	15.4	4	0.4	0.2	0	50	105-115
SATM105	14.8	4	1	0.2	0.6	50	105-115
SATM106	14.8	4	1	0.2	0	50	105-115
SATM107	14	5.4	0.4	0.2	0.6	50	115-125
SATM108	14	5.4	0.4	0.2	0	50	115-125
SATM109	13.4	5.4	1	0.2	0.6	50	115-125
SATM110	13.4	5.4	1	0.2	0	50	105-115
SATM111	14	5.4	0.4	0.2	0.6	50	105-115
SATM112	14	5.4	0.4	0.2	0	50	105-115

Tabla 7. Especificaciones y condiciones de procesamiento del almidón de maíz.

Almidón de Yuca							
Muestra	Almidón (g)	Sorbitol (g)	NaCl (g)	Urea (g)	Ácido Cítrico (g)	Agua (mL)	Temperatura de Extrusión Rotor/cabezal(°C)
SATY101	14.8	4	1	0.2	0.6	50	115-125
SATY102	14.8	4	1	0.2	0	50	115-125
SATY103	15.4	4	0.4	0.2	0.6	50	115-125
SATY104	15.4	4	0.4	0.2	0	50	105-115
SATY105	14.8	4	1	0.2	0.6	50	105-115
SATY106	14.8	4	1	0.2	0	50	105-115
SATY107	14	5.4	0.4	0.2	0.6	50	115-125
SATY108	14	5.4	0.4	0.2	0	50	115-125
SATY109	13.4	5.4	1	0.2	0.6	50	115-125
SATY110	13.4	5.4	1	0.2	0	50	105-115
SATY111	14	5.4	0.4	0.2	0.6	50	105-115
SATY112	14	5.4	0.4	0.2	0	50	105-115

Tabla 8. Especificaciones y condiciones de procesamiento del almidón de yuca.

### 3.2.4 Caracterización de Muestras.

#### Equipo.

- Máquina Universal de tracción Sintech. Modelo MTS 1/S.
- Balanza Sartorius modelo BP310P.
- Prensa Fred's Carver Inc. Modelo 2697.
- Microscopio electrónico de barrido JEOL Modelo JSM-5900LV.
- Espectrofotómetro de FTIR/FIR Spectrum 400 de Perkin-Elmer.
- Termoanalizador Mettler Toledo.

### 3.2.4.1 Pruebas Mecánicas (Módulo de Young).

Se produjeron películas en la prensa Fred's carver Inc. Modelo 2697 a una temperatura de 115 °C y 3 Tm de presión, colocando los fragmentos en moldes de aluminio rectangulares de 4 cm de ancho, 6 cm de largo y 1.5 mm de espesor donde se colocaron 10g de pellets de los TPS obtenidos. Seguido fueron cortados con moldes afilados, según la norma ASTM D1708-02a y ASTM D638-03 para tensiles de plástico. Se canalizaron las probetas al laboratorio 313 del conjunto E de la Facultad de Química de la UNAM donde con la asistencia de la I.A. Mariana Ramirez Gilly y el Dr. Alberto Tecante Coronel, se realizaron las pruebas de tensión elongación, en la maquina universal de tracción Sintech Modelo MTS 1/S a una temperatura ambiente de 24°C, a velocidad constante de 10 mm/min como lo establece la norma previamente mencionada, humedad ambiente y a una presión atmosférica de 585 mmHg



Figura 15. Pruebas de módulo de elasticidad. Maquina Universal de tracción Sintech. Modelo MTS

1/S

### 3.2.4.2 Espectroscopia Infrarroja (IR).

Se cortaron piezas de 1 cm de largo por 1 cm de ancho de las mejores películas de los TPS, según los resultados obtenidos de las pruebas de módulo de elasticidad. Las piezas fueron enviadas a la Unidad de Servicios de Apoyo a la Investigación (USAI) de la Facultad de Química en la UNAM para la obtención de los espectros de infrarrojo, con ayuda de la Q. Marisela Gutiérrez Franco.

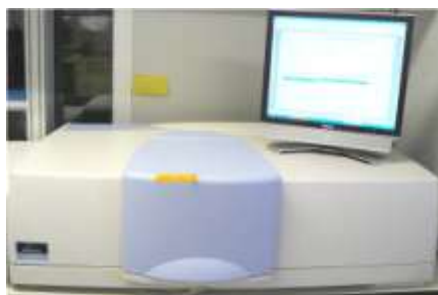


Figura 16. Espectrofotómetro de FTIR/FIR Spectrum 400 de Perkin-Elmer.

### 3.2.4.3 Microscopia Electrónica de Barrido (SEM).

De la misma manera que en la espectroscopia infrarroja se cortaron piezas de 1 cm de largo por 1 cm ancho de las mejores películas de TPS según los resultados obtenidos de las pruebas mecánicas y se llevaron al laboratorio de microscopia electrónica de barrido de la Unidad de Servicio de Apoyo a la Investigación (USAI) ubicado en el edificio del conjunto “E” Facultad de Química de la UNAM, con el apoyo del IQ. Rafael Iván Puente Lee para la determinación de la morfología superficial.



Figura 17. Microscopio electrónico de barrido JEOL Modelo JSM-5900LV.

#### 3.2.4.4 Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC).

0.5 gramos de películas de los mejores TPS según resultados obtenidos de las pruebas mecánicas, fueron cortadas en pedazos pequeños de no más de 0.5 cm de largo y se remitieron al laboratorio E-004 del Instituto de Investigación en Materiales de la UNAM. Donde se obtuvieron las gráficas y datos necesarios con ayuda del Q. Miguel Ángel Canseco Martínez.

## **4 Resultados y Discusión.**

### **4.1 Etapa 1: Experimentación y selección de condiciones de procesamiento para los TPS**

#### **4.1.1 Mezclado.**

En esta fase de la experimentación se realizaron diversos tipos de mezclas siendo la que contenía un exceso de agua la que otorgó mayor homogeneidad y una fácil incorporación del almidón y los plastificantes. En contraparte las mezclas en ausencia y media cantidad de agua para su mezclado fueron difíciles de procesar, obteniendo una mezcla no totalmente homogénea y con presencia de grumos.

De entre los plastificantes la glicerina mostró buenas cualidades para el mezclado debido a su estado líquido y la humedad que presenta; esto fue apreciado en las muestras ATYG102, ATYG103, ATMG102 y ATMG103. Por otro lado el polietilenglicol 4000 y el sorbitol se incorporaron sólo adecuadamente a las mezclas en exceso de agua es decir en las muestras ATYS103, ATMS103, ATYP103 y ATMP103.

#### **4.1.2 Gelatinización del Almidón.**

Se apreció significativamente que el exceso de agua en las muestras ATYG103, ATMG103, ATMS103, ATYS103, ATMP103 y ATYP103 mejoraba la gelatinización, sin importar el tipo de almidón y una deficiencia o nula cantidad de ésta retardaba el proceso, así como propiciaba la aparición de zonas no gelatinizadas dentro de las mezclas, como ejemplo las muestras ATYG101 y ATMS101 .

En cuestión de plastificantes el sorbitol concedió una mejor gelatinización que el glicerina y el polietilenglicol 4000; estos últimos provocaban una aglomeración de la mezcla y sólo una parcial gelatinización.

Por lo tanto las muestras ATMS103 y ATYS103 fueron las que cumplieron las características óptimas de homogeneidad en la gelatinización.

#### 4.1.3 Secado de gel.

Este paso resulta de vital importancia ya que el exceso de humedad en los geles tiende a ser un problema en la extrusión del material. Todas las muestras fueron sometidas a las mismas condiciones de secado de 24 horas a 30°C y éstas presentaron un secado uniforme, lo que permitió un mejor pulverizado y trituración para su posterior extrusión.

#### 4.1.4 Extrusión.

Las muestras fragmentadas fueron extruididas a una temperatura de entre 105°C-115 °C en rotor y 115-125 °C en cabezal; el material que no contenía agua en su mezcla no pudo ser procesado, debido a una alta viscosidad. Así como las mezclas que contenían plastificantes como el glicerol y polietilenglicol 4000 presentaron complicaciones en el extruido. En cambio las muestras con sorbitol como la ATMS 103, ATYS 103 fluyeron sin problemas y se obtuvieron perfiles cilíndricos de 3mm de diámetro sin coloración.

Con esta primera etapa se reconocieron puntos clave de las condiciones de procesamiento de los TPS de maíz y yuca, siendo las muestras ATMS103 y ATYS103 las mejores, es decir las de condiciones adecuadas para la experimentación; éstas contenían sorbitol como plastificante, descartando así para la segunda etapa la utilización de glicerina y polietilenglicol 4000; esto puede deberse a que el sorbitol presenta un menor efecto en la desestructuración del



almidón a diferencia del glicerina, por presentarse en forma sólida. Por otro lado el polietilenglicol mostró resultados desfavorables en la gelatinización.

Otro requisito que es indispensable considerar es proporcionar un exceso de agua destilada en el mezclado, considerando que el agua es un plastificante por excelencia y mejora la fluidez en la extrusión.

## 4.2 Etapa 2: Obtención y caracterización de los TPS.

### 4.2.1 Mezclado.

El mezclado se lleva a cabo en un agitador magnético con una velocidad de 30 rpm. Esto es de gran importancia, ya que la óptima realización de éste otorga mejores resultados, según datos obtenidos de la experimentación preliminar, es por ello que se le adicionó un excedente de agua a todas las muestras, facilitando la incorporación homogénea de los aditivos con el almidón y sorbitol. Ambos almidones no formaron grumos y tuvieron un correcto mezclado.

### 4.2.2 Gelatinización del almidón.

En ambas fases de la experimentación se pudo observar que tanto el almidón de maíz como el de yuca presentaban un comportamiento diferente en la etapa de gelatinización, ya que ésta ocurría en tiempos y temperaturas distintos, siendo más fácil de gelatinizar el almidón de yuca debido a su temperatura de gelatinización de 49-70 °C y un tiempo de 10 min en contra de los 62-72 °C y los 16 min del almidón de maíz, esto se puede deber a que el agua durante la etapa de gelatinización entra en las zonas amorfas del almidón provocando un hinchamiento y con el aumento de la temperatura el agua desprende las cadenas del almidón desde su superficie cristalina.

La movilidad térmica de las moléculas y el desprendimiento por la hinchazón disminuyen la cristalinidad, hasta que todos los gránulos son fragmentados y se obtiene una suspensión coloidal o gel. Esta gelatinización se ve beneficiada por la absorción de agua que depende de la cantidad de grupos OH<sup>-</sup> presentes en mayor proporción en la amilopectina, donde el almidón de yuca tiene un mayor porcentaje de este polisacárido. Entonces la facilidad con la que ocurre el hinchamiento de los gránulos de almidón depende de la cantidad de amilopectina y amilosa (amilosa presente en el almidón de yuca en un 17% y en el almidón de

maíz en un 28.3%) esta última es considerada un diluyente e inhibidor del hinchamiento. Por ende el almidón de yuca gelatiniza de manera más amorfa y desordenada (semejante a un sol-gel) pero con mayor rapidez en su gelatinización.

El ácido cítrico como aditivo provocó que la viscosidad de ambos almidones en la gelatinización disminuyera, haciendo a los geles más maleables para el secado como se pudo apreciar en las muestras SATM101, SATM103, SATM105, SATM107, SATM109, SATM111, SATY101, SATY103, SATY105, SATY107, SATY109 y SATY111. Esto se debe al pH ácido que provoca una súbita disminución en la viscosidad a causa de la hidrólisis ácida de las moléculas de almidón.

#### 4.2.3 Secado del gel.

El exceso de humedad modifica la viscosidad del gel, lo que causa problemas en el extrudido de las muestras. Por ello se realizó un secado del gel durante 24 h a una temperatura de 30 °C en un horno SL Shell Lab modelo CE3G, obteniendo un material más rígido, fácil de pulverizar y triturar. Ambos tipos de almidón tuvieron buen secado y no presentaron problemas en esta etapa.

#### 4.2.4 Extrusión.

El material triturado y pulverizado fue extrudido a 40 rpm constantes en todas las muestras y en intervalos de temperatura de 105-115 °C y 115-125 °C obteniendo perfiles cilíndricos de aproximadamente 3 mm de diámetro. El proceso de extrusión es pieza clave de los resultados debido a que un mal procesamiento puede dar origen a perfiles defectuosos con un bajo contenido de humedad, lo que los vuelve frágiles y quebradizos para ambos tipos de almidón.

De las muestras procesadas, la mayor parte de ellas no tuvo dificultades para fluir y ser extrudidas, análogamente se puede mencionar que las muestras con contenido de ácido cítrico como aditivo: SATM101, SATM103, SATM105, SATM107, SATM109, SATM111, SATY101, SATY103, SATY105, SATY107, SATY109 y SATY111 obtuvieron una mayor fluidez en la extrusión y mejoró su procesabilidad, sin embargo los perfiles contaban con irregularidades en su superficie.

La cantidad de NaCl y los diferentes intervalos de temperaturas no provocaron alteraciones en la extrusión a simple vista.

Por otro lado entre el almidón de maíz y el de tapioca se presentó una mayor fluidez en el último. Esto puede deberse a la humedad retenida en gran proporción por el almidón de yuca con un contenido más alto de amilopectina, lo que presenta menor viscosidad.

Los perfiles obtenidos tenían coloración blanca en presencia de ácido cítrico esto puede adjudicarse a la posible cristalización del ácido dentro de los perfiles; en cambio, las que no lo contenían se presentaban transparentes con ligera coloración amarillenta en algunos casos.

Se observó que los intervalos de temperatura no afectaron al proceso de extrusión ni a los perfiles obtenidos. Así como no existió una diferencia significativa entre la apariencia y la extrusión de los distintos almidones.

#### 4.2.5 Fragmentado.

Los perfiles fueron cortados en fragmentos de 5 mm de largo por 3 mm de diámetro de todas las muestras y se almacenaron en un ambiente de poca humedad y a la sombra.

#### 4.2.6 Obtención de Biopelículas.<sup>3</sup>

El prensado térmico fue la técnica más adecuada para el moldeado de las películas adecuado, ya que permite un control de la temperatura, el tiempo y la presión que se ejerce sobre los pellets de TPS, dando como resultados películas con espesores de entre 0.2 mm y 0.8 mm.

Particularmente las películas que provenían de pellets que contenían ácido cítrico presentaron deficiencias en su homogeneidad ya que exhibían diminutas burbujas de aire y humedad atrapadas en su interior después del prensado. Una causa posible es que el procesamiento mostró un menor tiempo de residencia en la extrusión debido a las propiedades físicas modificadas por el ácido cítrico, lo que provee a los perfiles una mayor retención de humedad.

Por otro lado algunas películas presentaron agrietamientos en distintas zonas, esto es resultado de la falta de humedad ya que se vuelven quebradizas. Existieron algunas muestras que no formaron películas a consecuencia de su baja humedad que impedía su aglomeración en una sola pieza.

Las películas fueron almacenadas en un ambiente de poca humedad y a la sombra.



Figura 18. Representación de Probetas.

#### 4.2.7 Caracterización de los TPS.

##### 4.2.7.1 Pruebas Mecánicas. Módulo de Young.

Fueron cortadas por triplicado probetas de todas las películas obtenidas, para realizar pruebas de tensión elongación según el método estándar de propiedades de tensión para plásticos ASTM D638-03 y el método estándar para propiedades de tensión de plásticos por el uso de tensiles ASTM D1708-02a.

Las probetas tuvieron dimensionamiento según el espécimen TIPO V de la norma estándar ASTM D638-03 por tener un espesor menor a 4mm, contar con material limitado y debido a la estabilidad térmica del material; estas son algunas de las razones por las que se seleccionó este tipo de probeta.

Se realizó la prueba de módulo de elasticidad en una maquina universal de tracción Sintech Modelo MTS 1/S a una velocidad de prueba tipo C de 10mm/min estipulado en la norma ASTM-D638, a una temperatura ambiente de 24 ° C y una presión de 580 mmHg.



Figura 19. Probetas después de Pruebas Mecánicas.

Se obtuvieron la extensión, el tiempo de elongación y la carga a partir de las cuales se calculó el módulo de Young a partir de:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Donde:

E: Módulo de Young (Pa).

$\varepsilon$ : Deformación unitaria en cualquier punto de la barra. (%).

$\sigma$ : Esfuerzo normal sobre el área de sección transversal (Pa).

$$\sigma = \frac{F}{at}$$

F: Carga o fuerza por área ( $\overrightarrow{kg}$ )

at: Área transversal ( $m^2$ )

$$at = wc * g$$

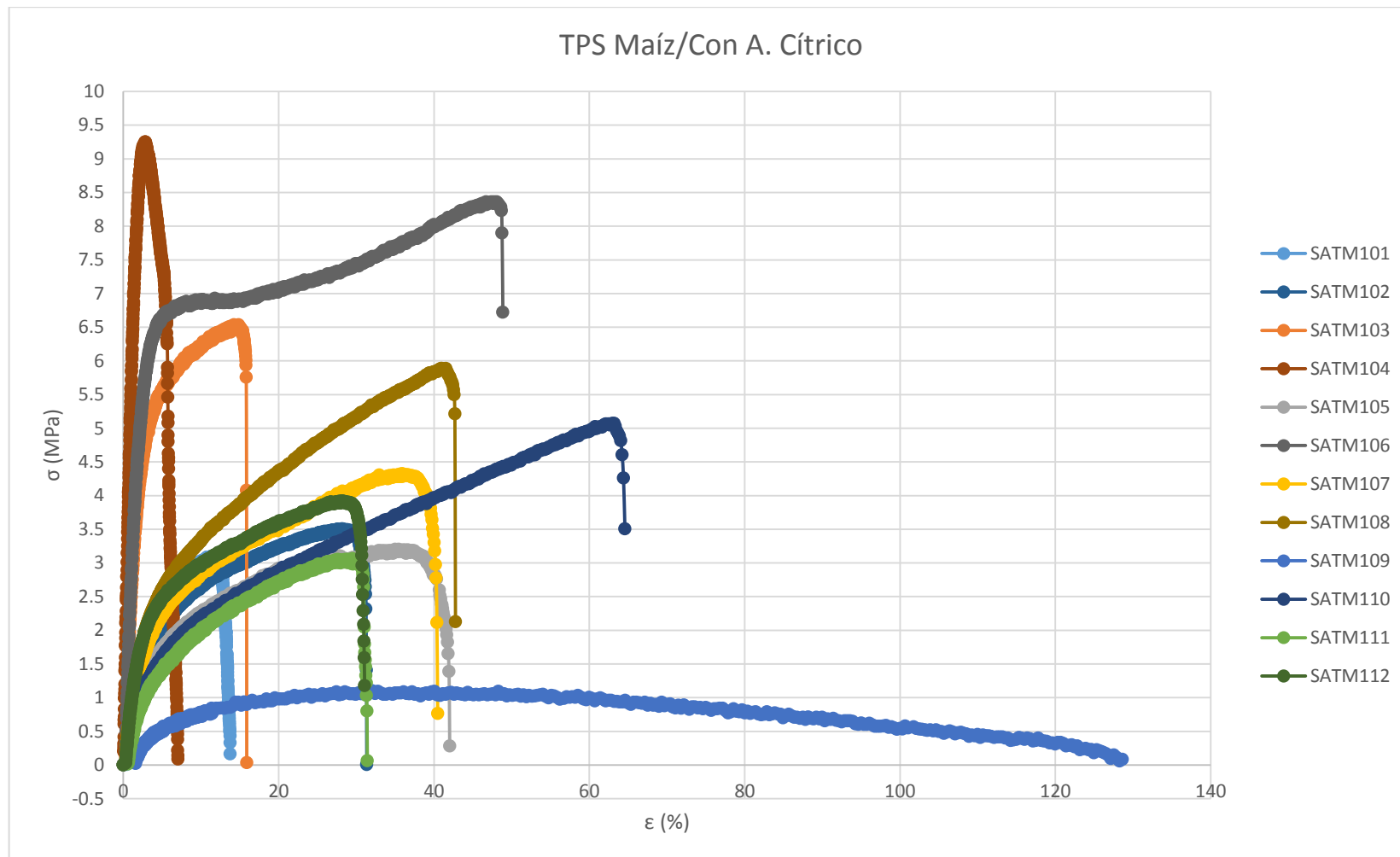
wc: Ancho de la sección estrecha (m)

g: Espesor de la probeta (m)

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100$$

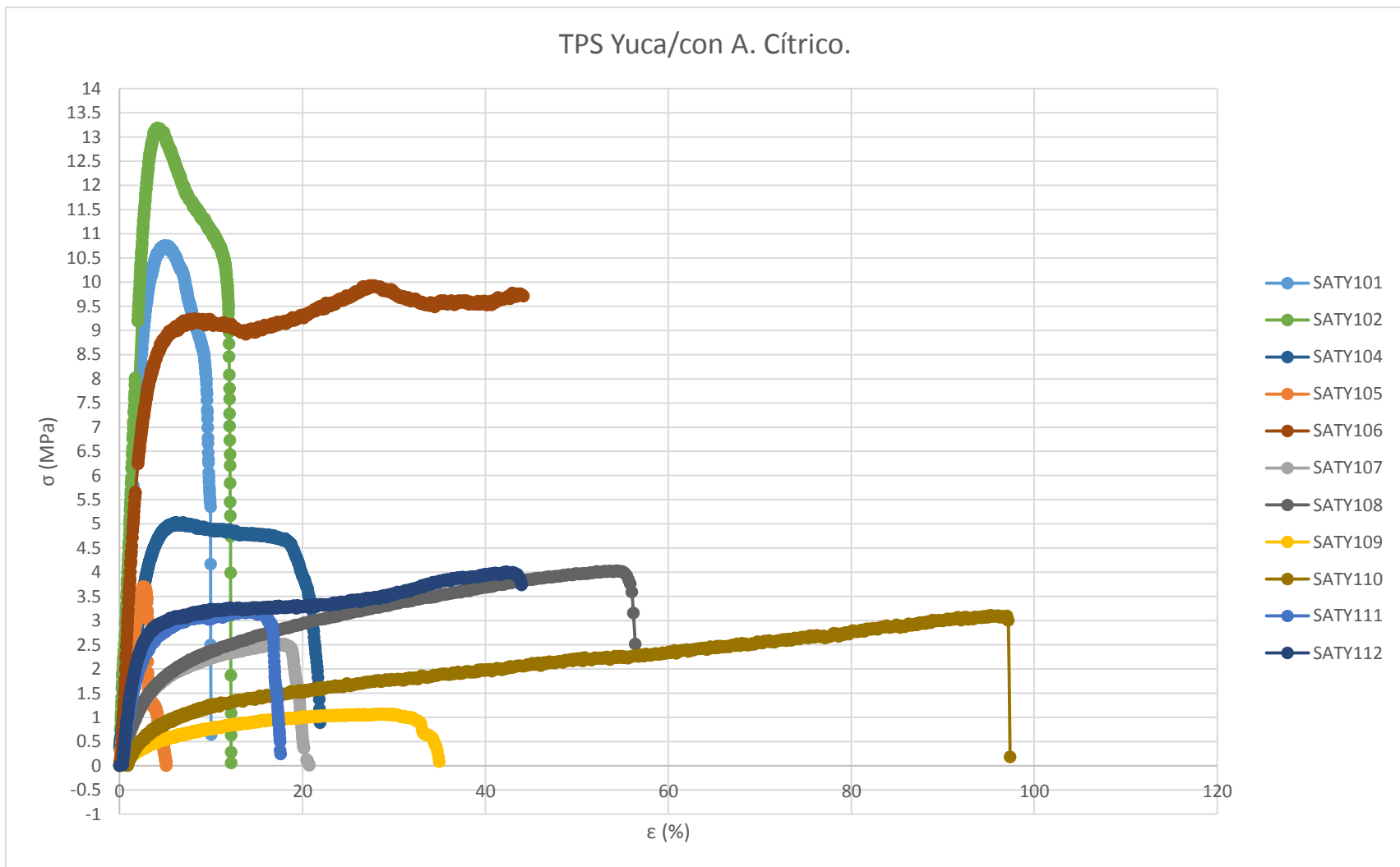
Después de obtenidos los valores para cada tipo de almidón se realizó un promedio entre los triplicados para cada de una de las muestras.

Se graficaron los resultados obtenidos por separado para cada almidón y así obtener el módulo de elasticidad, que es la pendiente del origen de la curva al punto de la carga máxima de la misma.



Grafica 1. Esfuerzo normal vs deformación unitaria. TPS de maíz.





Grafica 2. Esfuerzo normal vs deformación unitaria. TPS de yuca.

Seguidamente se compararon los distintos valores obtenidos, encontrando entre ellos diversas características. Algunas de las muestras exhibían gran elongación pero carecían de resistencia, así como el caso contrario de mostrar gran resistencia pero poca elongación. Cabe resaltar que ciertas muestras cuentan con ambas características ya que les fueron proporcionadas por los aditivos.

Uno de los problemas más comunes en las probetas fue la presencia de burbujas, provocando que existieran rupturas prematuras en distintas zonas, Como ya ha sido mencionado en la sección anterior, es causado por el menor tiempo de acomodo interno y la presencia de burbujas de aire y agua en el proceso de extrusión.

Se seleccionaron las muestras que presentaron mejor módulo de elasticidad para ambos tipos de almidón, las cuales son: SATM103, SATM104, SATM 106, de maíz y SATY101, SATY102, SATY106 de yuca.

#### 4.2.7.2 Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)

Se sometieron a pruebas de calorimetría diferencial de barridos a las muestras SATM106 y SATY106 y se obtuvieron gráficos de flujo de calor contra temperatura. (Apéndice A)

Analizando los gráficos se visualizaron tres aspectos importantes, la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ), temperatura del punto de fusión ( $T_m$ ), y temperatura de descomposición.

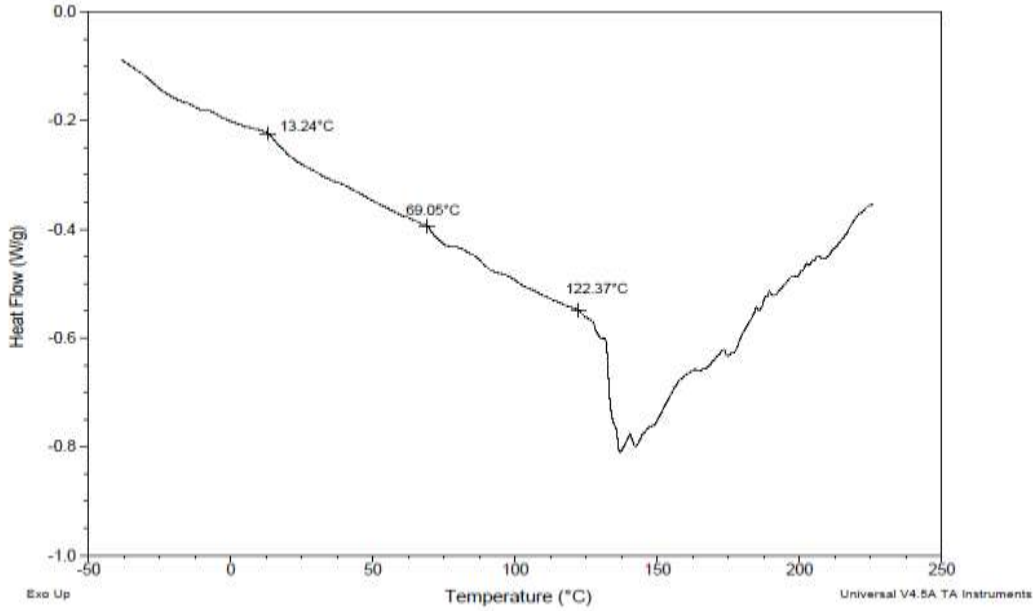


Figura 20. Calorimetría diferencial de barrido de la muestra SATM106

En el gráfico para la muestra SATM106 se aprecian alteraciones en distintos puntos, evidenciando una temperatura de transición vítrea de 69.05 °C y un punto de fusión aproximadamente entre 125 y 140 °C. De manera importante se menciona que las demás alteraciones o ruido en el gráfico pueden ser consecuencia de la presencia de humedad y la alta sensibilidad del aparato.

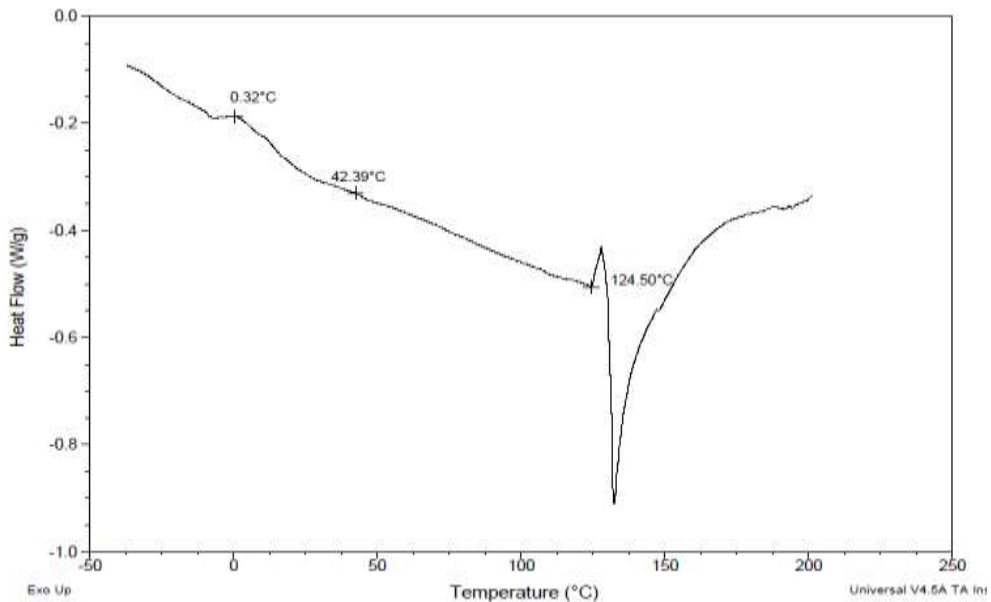


Figura 21. Calorimetría Diferencial de Barrido de la muestra SATM106

Para el gráfico de la muestra SATY106 es posible notar diversas alteraciones, con una menor cantidad de ruido o humedad que la muestra anterior. La temperatura de transición vítrea se encuentra en 42 y 44 °C, mientras que la temperatura de fusión ocurre a 135 °C. Aparentemente en este caso pueden existir un hinchamiento o cierta humedad atrapada en la muestra que provoca a 128 °C un pico exotérmico.

En ambos gráficos, después de haber ocurrido la fusión se observa degradación del material.

Adicionalmente se realizaron las termogavimetrías de ambos almidones, para conocer su temperatura de descomposición y contenido de humedad. (Anexo Apéndice A).

#### 4.2.7.3 Microscopia electrónica de barrido

A las muestras calificadas como las mejores en las pruebas de módulo de elasticidad se les realizaron microscopias SEM, para conocer así la morfología superficial de las películas.

Es necesario recubrir en oro a éstas para poder apreciar claramente las estructuras superficiales.

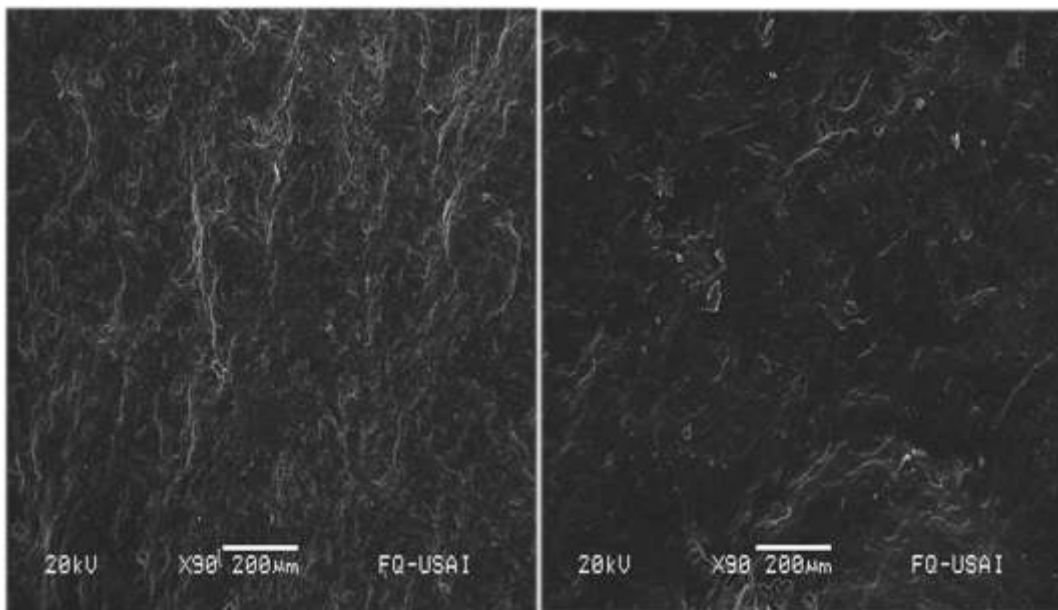


Figura 22. Microscopia electrónica de barrido. De lado izquierdo muestra SATM104 y de lado derecho muestra SATM106

Las muestras presentaron morfologías distintas, como se pueden notar en la figura 22. Del lado izquierdo se encuentra la muestra SATM104 con una morfología superficial ligeramente desordenada. En la parte derecha se localiza la muestra SATM106 que contiene una superficie altamente rugosa y áspera.

Como se apreció en las pruebas mecánicas, la muestra SATM106 tiene una mayor elongación y menor resistencia en comparación a la muestra SATM104.

Esta última contiene una menor proporción de plastificante en la mezcla de almidón y una menor cantidad de cloruro de sodio en su composición.

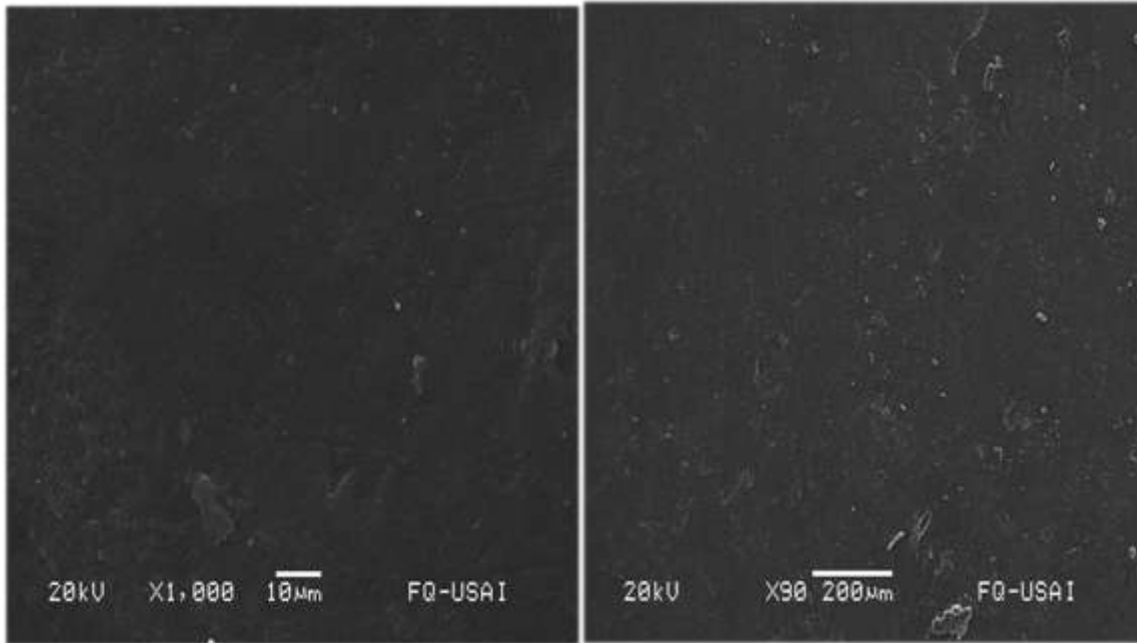


Figura 23. Microcopia electrónica de barrido. De lado izquierdo muestra SATY102 y de lado derecho muestra SATY106

La figura del lado izquierdo representa la muestra SATY102 y en la parte derecha la muestra SATY106, éstas no presentan grandes diferencias entre sí, debido a su similar formulación.

Las superficies de las películas de almidón de yuca eran planas y homogéneas presentando pocos relieves en comparación con las películas de almidón de maíz, que mostraron una superficie irregular y rugosa con relieves más pronunciados.

Esto se debe a los diferentes contenidos de amilosa y amilopectina entre cada tipo de almidón, ya que el almidón de tapioca contiene mayores cantidades de amilopectina, al ser ramificada dota de mayores interacciones y uniones entre moléculas similares provocando un mejor ordenamiento.

#### 4.2.7.4 Espectroscopia Infrarroja.

Los espectros obtenidos que se mencionan en este análisis se encuentran en el apéndice B.

Los espectros obtenidos de las muestras SATM103, SATM104, SATM106, SATY102, SATY104 y SATY106 no tuvieron gran variación en comparación entre ellos.

En el espectro se reconocen las bandas del grupo O-H ( $3294.46\text{ cm}^{-1}$ ), CH<sub>3</sub>, CH<sub>2</sub>, CH (2923.13) claramente, donde se corrobora la presencia del sorbitol en la mezcla. Analizando los espectros de sorbitol y amilopectina, se puede observar la representación de ambos en el espectro obtenido experimentalmente, destacando la superposición como la causa principal por la cual no se pueden cotejar los grupos funcionales de los demás compuestos.

Al haber obtenido estos resultados, sólo se pueden observar los grupos funcionales más relevantes de cada compuesto.

### 4.3 Análisis Estadístico.<sup>53,57</sup>

Realizadas las pruebas mecánicas se calculó gráficamente el módulo de elasticidad tangente al 1% de deformación para cada mezcla. Los valores obtenidos son los siguientes:

Maíz		Yuca	
Muestra	$\epsilon$ (1%) (MPa)	Muestra	$\epsilon$ (1%) (MPa)
SATM101	84.91	SATY101	346.73
SATM102	63.82	SATY102	482.80
SATM103	240.99	SATY103	0.00
SATM104	452.24	SATY104	137.84
SATM105	51.12	SATY105	173.30
SATM106	271.55	SATY106	385.31
SATM107	72.83	SATY107	58.13
SATM108	85.49	SATY108	63.81
SATM109	2.87	SATY109	13.28
SATM110	48.56	SATY110	10.34
SATM111	32.77	SATY111	101.64
SATM112	90.81	SATY112	123.84

Tabla 9 y 10. Módulo de elasticidad al 1% de deformación para TPS de maíz y yuca respectivamente.

Para obtener la selección de niveles para cada factor, se calculan los promedios de E que correspondan al mismo nivel. Por ejemplo, para el nivel alto (+) del porcentaje sorbitol/almidón en maíz, se realiza lo siguiente:



$$\bar{E} = \frac{E_{SATM101} + E_{SATM102} + E_{SATM103} + E_{SATM104} + E_{SATM105} + E_{SATM106}}{6}$$

$$\bar{E} = \frac{84.91 + 63.82 + 240.99 + 482.8 + 51.12 + 271.55}{6} = 199.20$$

Aplicando los promedios de E para cada factor en los niveles alto (+) y bajo (-) se obtienen las siguientes tablas:

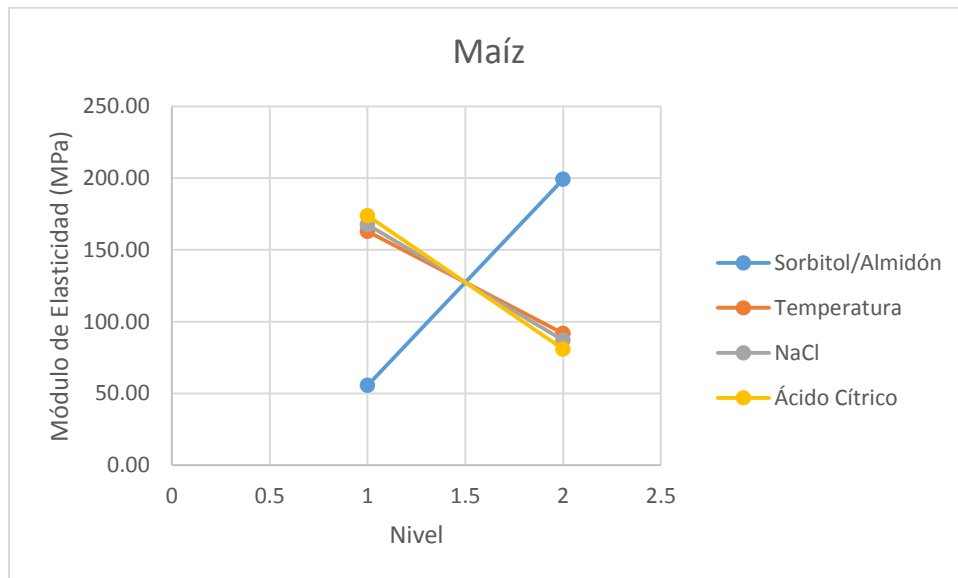
Maiz								
Nivel	Sorbitol/almidon		Temperatura		NaCl		Ácido Cítrico	
	Valor (%)	$\bar{E}$ (MPa)	Valor (°C)	$\bar{E}$ (MPa)	Valor (%)	$\bar{E}$ (MPa)	Valor (%)	$\bar{E}$ (MPa)
1 (-)	27/70	55.55	105/115	162.935	2%	167.616	0%	173.838
2 (+)	20/74	199.20	115/125	91.8182	5%	87.1378	1%	80.92

Tabla 11. Promedio del módulo de elasticidad para cada factor. TPS de maíz.

Yuca								
Nivel	Sorbitol/almidon		Temperatura		NaCl		Ácido Cítrico	
	Valor (%)	$\bar{E}$ (MPa)	Valor (°C)	$\bar{E}$ (MPa)	Valor (%)	$\bar{E}$ (MPa)	Valor (%)	$\bar{E}$ (MPa)
1 (-)	27/70	61.84	105/115	155.378	2%	80.8768	0%	195.563
2 (+)	20/74	249.237	115/125	155.698	5%	230.199	1%	115.513

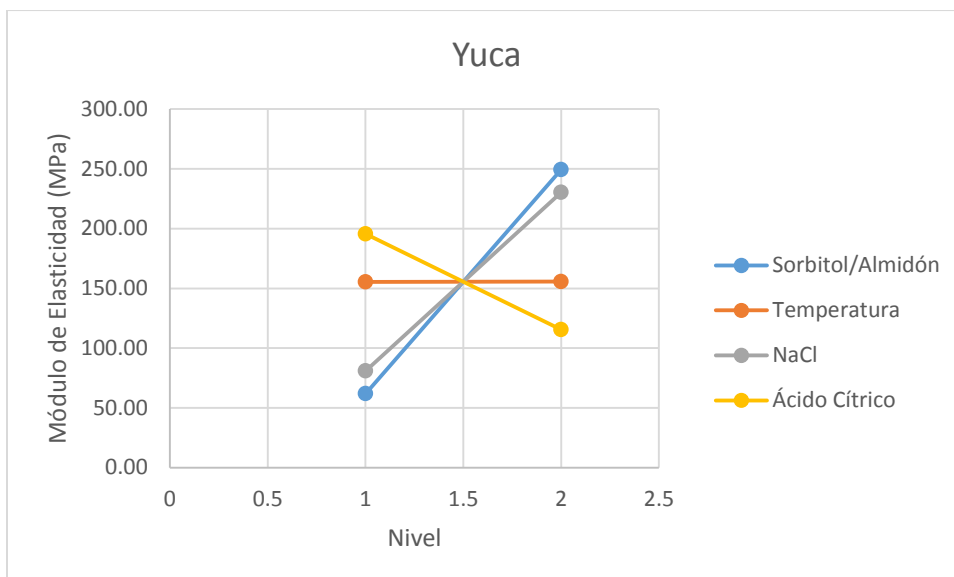
Tabla 12. Promedio del módulo de elasticidad para cada factor. TPS de yuca.

Al Graficar el promedio de los módulos de elasticidad en ambos niveles se obtiene lo siguiente:



Grafica 3. Módulo de elasticidad vs Nivel para TPS de maíz.

En la gráfica 3 se observa la tendencia en los niveles, donde la modificación de sorbitol/almidón de alto (+) a bajo (-) disminuye el módulo de elasticidad, siendo mejor en altos niveles. Para la temperatura, NaCl y ácido cítrico es inverso, ya que en los niveles bajos el módulo de elasticidad es mayor. De tal forma que aumentando la cantidad de almidón y manteniendo baja la proporción de aditivos, se obtiene la mejor combinación para el desarrollo del TPS de Maíz.



Gráfica 4. Módulo de elasticidad vs Nivel para TPS de yuca.

En el caso de la gráfica 4 se obtiene un arreglo poco distinto al anterior, ya que al mantener el nivel alto en la proporción de Sorbitol/almidón y el NaCl el módulo de elasticidad genera una mejor respuesta; por otro lado la temperatura no afectó el proceso en la elaboración y el Ácido Cítrico mejora el módulo de elasticidad en los niveles bajos, obteniendo la mejor combinación de niveles para el desarrollo de los TPS de yuca.

Obsevando ambas Gráficas (3 y 4), el cruzamiento entre líneas de los factores, corresponde a una fuerte interaccion para el desarrollo de los TPS.

Comparando los almidones, se observa un cambio en el uso de NaCl, ya que mientras en el almidón de maíz el bajo nivel es mejor, en el almidón de yuca el alto nivel da mejor respuesta. La variación entre los TPS's se debe a la cantidad de amilosa que presentan cada uno, ya que para el maíz es de 22 a 28%- y en la yuca de 16 a 22% respectivamente.

A continuación se muestra una tabla comparando el mejor diseño para cada TPS obtenido, según la selección de niveles.

Muestra	Sorbitol/almidón (%)	Temperatura (°C)	NaCl	Ácido Cítrico	E (Mpa)
SATM104	-	-	-	-	452.24
SATY102	-	+/-	+	-	482.80

Tabla 13. Resultados de mejores condiciones de TPS, según módulo de elasticidad para cada almidón.

Cabe destacar que los módulos de elasticidad en ambos TPS son cercanos, siendo mayor el de almidón de yuca, el cual presentaba una mayor resistencia. Obteniendo así los modelos con las mejores características a lo largo de la experimentación.

#### 4.4 Aplicaciones.<sup>13,52</sup>

Pese a que el presente trabajo se basó sólo en los almidones de maíz y yuca, existen numerosas fuentes de donde obtener el almidón para la fabricación de polímeros biodegradables.

La búsqueda de nuevos materiales y las características de flexibilidad y resistencia de los TPS de la presente investigación brindaron la oportunidad de desarrollar una visión para su aplicación en el área agrónoma el llamado acolchado. Donde una vez concluida la vida útil del bioplástico este se degrada y se incorpora a la tierra, con la oportunidad de otorgar nutrientes a esta y reducir el impacto ambiental en términos de consumo de energía y generación de residuos.

De la información conseguida tras el diseño de experimentos y su análisis estadístico, se llevaron a cabo reproducciones de las mejores muestras para corroborar los resultados y añadir pigmentación, que le proporcione resistencia a

la incidencia de los rayos UV y propiciando una duración mayor. Ya que este tipo de película es diseñada para su uso agrícola en aquellos cultivos donde la siembra se realice mediante plántones, y se persiga como objetivo principal el proteger al cultivo de la proliferación de malas hierbas, evitando que el crecimiento de las mismas pueda mermar el desarrollo de las plantas, pero manteniendo un adecuado aporte de calor al suelo.

También se realizó una película sin coloración ya que hay cultivos que necesitan acumular mayor cantidad de energía solar por ser cultivos donde la siembra se realiza de forma directa mediante semillas y se busca asegurar el crecimiento para proporcionar una mayor productividad al cultivo, además de defender a los cultivos y el suelo de los agentes atmosféricos.

Se seleccionaron para el análisis las muestras de almidón de tapioca SATY102 y SATY106, elegidas en base al análisis estadístico. Dejando claro que sólo se reprodujeron las muestras de almidón de yuca debido a que su procesamiento fue más sencillo que el almidón de maíz y el análisis fue sólo cualitativo.

Las muestras fueron procesadas de la misma forma y se les añadió un 3% de negro de humo desde la etapa de mezclado para su mejor homogeneidad.

Se obtuvieron resultados similares a las experimentaciones anteriores en las pruebas mecánicas y en su caracterización, no se apreciaron cambios significativos en la morfología ni la aparición del colorante en las espectroscopias, ya que pudo existir un traslape entre grupos funcionales del almidón, el sorbitol y el negro de humo.

A las películas obtenidas se les sometió a una prueba cualitativa de degradación al medio ambiente, exponiendo estas a factores climáticos como la lluvia, los rayos solares UV y el aire. Colocando estas sobre tierra ocupada normalmente para sembradíos con gran contenido de humedad.

Se hizo un seguimiento diario durante 2 meses (tomando en cuenta que este es el tiempo mínimo de resistencia para acolchados en invernaderos), con un registro fotográfico.


Tiempo	TPS con negro de Humo	TPS sin negro de humo
Inicio		
2 Semanas		
4 Semanas		
6 Semanas		
8 Semanas		

Tabla 14. Seguimiento de degradación de los TPS

Se pudo apreciar que las biopelículas se ven afectadas con un hinchamiento cuando son expuestas al agua de lluvia pero sin provocar su quiebre, éstas recobraban su forma conforme eran secadas por la luz solar y el aire.

No se observó crecimiento de microorganismos, ni efectos adversos a la tierra donde se depositaron.

El agrietamiento se presentó en algunas de estas películas en la sexta y séptima semana debido al proceso continuo de hinchamiento y secado, percibiendo que este último proceso afectaba de manera contundente a la integridad de estos bioplásticos.

Comparando los TPS con y sin negro de humo. No se advirtieron diferencias relevantes en la resistencia a la intemperie, pero la coloración puede prever el crecimiento de hierbas adventicias otorgando sólo la cantidad necesaria de luz y temperatura a la tierra.

Al término de la observación, las películas de TPS conservaban gran parte de su estructura pero con un aumento en su grosor debido a la humedad. Simultáneamente se distinguieron cuarteaduras en sus bordes, al tacto se percibía una disminución en su resistencia.

Es conveniente mencionar la necesidad de mejorar el carácter hidrofóbico. Debido a que es gran causante de la desestructuración de las películas e hinchamiento prematuro, que puede hacerlos vulnerable a condiciones extremas de temperatura y precipitaciones.

## **5. Conclusiones y Recomendaciones.**

### 5.1 Conclusiones.

La obtención de los TPS se basó en experimentos previamente realizados, de donde se consiguieron los factores importantes en la experimentación.

Los factores establecidos que afectan el procesamiento son: Temperatura, humedad y el uso de aditivos como urea, ácido cítrico y cloruro de sodio (NaCl).

El uso de los plastificantes sorbitol, glicerol y PEG 4000 ofrecen resultados diferentes, ya que al utilizar PEG 4000 o glicerol en la mezcla, afectó el procesamiento de gelatinización, mientras que el sorbitol ofreció excelentes resultados en la plastificación, siendo este el mejor para la producción de TPS en la presente investigación.

La caracterización de TPS se llevó a cabo por espectroscopia infrarroja, la determinación de módulo de elasticidad y la calorimetría diferencial de barrido (DSC), las cuales otorgaron los resultados para seleccionar las mejores condiciones de procesamiento.

Los resultados obtenidos para cada almidón dan como mejor materia prima al almidón de yuca, obteniendo un mejor módulo de elasticidad, así como un mejor procesamiento para la obtención de los TPS.

Las mejores condiciones obtenidas para el procesamiento de TPS de yuca son: Temperatura 105 °C para rotor y 115 °C para cabezal, 20/75 % para sorbitol y almidón respectivamente, 5% de NaCl y 0% de Ácido Cítrico.

Existen distintos usos para los TPS, tal es el caso de acolchados, ya que se requiere para esta aplicación un tiempo de degradación medio así como afinidad



al agua para no afectar al ambiente. El utilizar negro de humo como colorante y realizar pruebas de degradación en tierra con características similares a las utilizadas en la agricultura, permitieron observar una durabilidad mayor de 2 meses, lo que es un tiempo aceptable para el uso en la agricultura.

Como conclusión final, la obtención y caracterización de los TPS de yuca y maíz es un gran avance en la producción de biopelículas. La utilización de plastificantes como Sorbitol, PEG, Glicerina y aditivos tales como ácido cítrico, cloruro de sodio y urea, son de gran importancia para el desarrollo de mejoras en las propiedades como la resistencia al quiebre, humedad, elasticidad y degradabilidad.

## 5.2 Recomendaciones

Debido a que el empleo de aditivos ofreció los mejores resultados es aconsejable la utilización de estos, ya que mejoran las propiedades mecánicas y su procesabilidad.

Es recomendable el empleo, en posteriores investigaciones, de aditivos que puedan combatir la sensibilidad de los TPS frente a la humedad, como el tween 20<sup>®</sup>.

Existen numerosas fuentes renovables para obtener los almidones y es necesario continuar con la investigación de diferentes fuentes de estos como el arroz, la papa y diferentes especies de plantas nativas de México, como las cannaceae que contienen un gran porcentaje de amilosa en sus almidones.

Debe realizar un estudio de la viscosidad de los TPS de maíz y yuca, ya que la procesabilidad se ve afectada por la viscosidad del material y esto juega un papel importante en los resultados obtenidos, a causa de la humedad eliminada y el tiempo en que el material fluye en la extrusión.

Es aconsejable el mezclado previo a la gelatinización debido a que una buena homogeneidad en la mezcla otorga una mejor interacción entre el plastificante, aditivos y almidón.

Se sugiere una investigación sobre la pérdida y el exceso de humedad en el procesamiento de los TPS y sus relaciones con sus propiedades físicas.

Cabe añadir que existen pruebas importantes a realizar a los TPS, como la obtención de los índices de absorción de agua (WAI) y de solubilidad en agua (WSI) calculados a partir del método Anderson. Estos índices miden el grado de

gelatinización del almidón y el grado de degradación del termoplástico que se ha fabricado, respectivamente.

Para tener resultados confiables en cuanto a la degradación y su medición se aconseja el empleo de las pruebas contenidas y sugeridas en la NORMA MEXICANA NMX-E-122-1986, método de prueba de envejecimiento acelerado de películas plásticas y plásticos para uso agrícola.

## 6. Bibliografía.

1. Hallauer, R. Arnel. *Speciality Corns*, CRC Press LLC (ed). 2nd edition 2001, Estados Unidos.
2. Vishu, Shah, *Handbook of Plastic Testing Technology*, John Wiley & Sons, Inc. (Ed), 2nd edition, 1998. pp. 202-205, 16-49, United States.
3. Manda Chanda, Salil K. Roy, *Plastic Technology Handbook*, Marcel Dekker, Inc. (Ed), 3rd edition revised and expanded, 1977, United States.
4. Socrates George, *Infrared Characteristic Group Frequencies Tables and Charts*, John Wiley & Sons – Ltd. (Ed), 2nd edition, 1994, Inglaterra.
5. Simon Ivan, *Radiación Infrarroja*, Editorial Reverte Mexicana, S.A. 1era Edición 1968, México.
6. Richard N. Dixon, *Espectroscopía y Estructura*, Alhambra, S.A. 1967, España.
7. K.S. Birdi, *Scanning Probe Microscopes: Application in Science and Technology*, CRC Press LLC. (Ed), 2000, Estados Unidos, pp. 28.
8. Gonzales Roberto, Ramiro Pareja, Carmen Ballesteros, *Microscopía Electrónica*. Editorial EUDEMA, 1991, España, pp. 71-75.
9. Esteva Gustavo, Marielle Catherine, *Sin Maíz No Hay País*, Consejo Nacional para la Cultura y las Artes, Primera Edición, 2003, México, pp 153-176.
10. W. Jugnerheimer Robert, Ph. D. *Maíz: variedades Mejoradas, Método de cultivo y Producción de semillas*, Editorial Limusa, 1988. Estados Unidos, pp 35, 137.
11. Takeo Ángel Kato Yamakake, Cristina Mapes Sanchez, Luz María Mera Ovando, Antonio Serratos Hernandez, *Origen y Diversificación del Maíz: Una Revisión Analítica*, Universidad Nacional Autónoma de México, 2009, México, pp 56.

12. Navarro Pedreño, Herrero Gómez Lucas, Mataix Beneyto, *Residuos Orgánicos y Agricultura*. Universidad de Alicante, 1995, España, pp. 12, 16, 33.
13. Francisco Martín de Santa Olalla Mañas, José Arturo de Juan Valero, *Agronomía del Riego*, Mundi Prensa, (Ed), 1993, España, pp. 19.
14. *La Economía Mundial de la Yuca: Hechos Tendencias y Perspectivas*, Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2000. Roma, Italia.
15. Amar K. Monhanty, Manjusri Misra, Lawrence T. Drzal, *Natural Fibers, Biopolymers and Biocomposites*, CRC-Taylor & Francis, 2005, Estados Unidos, pp. 639.
16. Martin Malmsten, *Biopolymers at interfaces*, 2nd Edition, Marcel Dekker, 2003, Estados Unidos.
17. Uribe Velasco Miguel, Pierre Y. Mehrenberg, *Los Polímeros Síntesis Y caracterización*, Editorial Limusa y Noriega, 1980, México.
18. Jiménez Ibarra, Luis, Rodríguez Piña, Antonio, *Acolchados de Suelos con Películas Plásticas*, Editorial Limusa, 1991, México.
19. Gross, A. Richard, Scholz, Carmen, *Biopolymers from polysaccharides and Agroproteins*, American Chemical Society (Ed), 1978, Estados Unidos.
20. Roger, P., Brown, *Handbook of Plastic Test Methods*, Longman Scientific and Technical (Ed), 1988, pp. 116-131, Estados Unidos.
21. Antonio Turrent Fernández, Timothy A. Wise, Elise Garvey, *Factibilidad de Alcanzar el Potencial Productivo de Maíz 7 de México*, Woodrow Wilson Center, Artículo disponible en: <http://www.ase.tufts.edu/gdae/Pubs/wp/12-03TurrentMexMaize.pdf>, 2012.
22. *Made in America: Corn Refined Products Help U.S. Industries Thrive: Corn Refiners Association 2012 Annual Report*, Corn Refiners Association, 2012, Estados Unidos.
23. J.F Mano, D. Kaniarova, R.L Reis, *Thermal Properties of Thermoplastic Starch/Synthetic Polymer Blends With Potential Biomedical Applicability*,

- Journal of Materials Science: Materials in Medicine. Vol 14, pp. 127-135, 2003.
24. Robert Shanks, Ing Kong, *Thermoplastic Starch*, Applied Sciences, Thermoplastic Elastomers RMIT University, Melbourne Australia, 2012, pp. 95-115.
  25. Rodrigo Ortega-Toro, Alberto Jiménez, Pau Talens, Amparo Chiralt, *Efecto de la Incorporación de Tensoactivos en las Propiedades Físicas de Films a Fase de Almidón de Maíz*. Departamento Tecnología de Alimentos-Instituto Universitario de Ingeniería de Alimentos para el Desarrollo. Universidad Politécnica de Valencia, 2012
  26. G. F. Fanta, *Starch-Thermoplastic Polymer Composites by Graft Polymerization*, Proceedings Corn Utilization Conference II, National Corn Growers Association. 1988.
  27. Héctor S. Villada, Harold A. Acosta y Reinado J. Velasco, *Biopolímeros Naturales Usados en Empaques Biodegradables*, Revista de temas agrarios, Vol. 12:(2), 2007, Colombia.
  28. Noyes Robert, Citric acid production processes, Noyes Development Corp., 1969 , pp. 157
  29. Manual de operación del espectrómetro FT-Raman. Editado por Nicolet Analytical Instruments, 1990, Estados Unidos.
  30. X.F. Ma, J.G. Yu J.J. Wan, *Urea and ethanolamine as a mixed plasticizer for thermoplastic starch*. Carbohydrate Polymers Volume 64, Issue 2, 11 May 2006, pp. 267–273.
  31. J.A Ghani, I.A Choudhury, H.H Hassan, *Application of Taguchi method in the optimization of end milling parameters*, Journal of Materials Processing Technology Volume 145, Issue 1, 2004, pp. 84–92.
  32. C., P., Sherman Hsu, Ph., D., *Infrared Spectroscopy*, Mallinckrodt Baker Division, 2001.
  33. Rothstein, M.A., *Occupational Safety and Health Guideline for Carbon Black: Potential Human Carcinogen*, 1988.

34. Soccol, R. Carlos, Vandenberghe, Luciana P. S., Rodrigues, Critine, Pandey, Ashok, *New Perspectives for Citric Acid Production and Application*, Biotechnology Division, Department of Chemical Engineering, 2006, Estados Unidos.
35. Antony, Fiju, Antony, Frenie, *Teaching the Taguchi Method to industrial Engineers*, Work Study, Volume 50, 2001.
36. Ma, X.F., Yu, J.G., Wan, J.J., *Urea and ethanolamine as a mixed plasticizer for thermoplastic starch*, Elsevier. Carbohydrate Polymers, 2006.
37. Yigitoglu, Mustafa, *Production of Citric Acid by Fungi*, Journal of Islamic Academy of Science, 1992.
38. Luna, Gabriela, Villado, Hector, *Almidón Termoplástico de Yuca Reforzado con Fibra de Fique: Preliminares*, Departamento de Agroindustria. Universidad de Cauca, 2009.
39. Camacho Correa, Claudia Brenda, *Nanocompuestos Biodegradables basados en Almidón de Maíz Termoplástico y Arcillas Nanoestructuradas*, Presentada en la Universidad Nacional Autónoma de México.
40. Mere, Javier, Tesis: *Estudio del Procesado de un Polímero Termoplástico basado en Almidón de Patata Amigable con el Medio Ambiente*, Presentada en la Universidad Carlos III de Madrid, España.
41. <http://www.arqueomex.com/S2N3nAgricultura120.html>. Fecha de consulta: 2 de junio 2013.
42. <http://faostat3.fao.org/> Fecha de consulta: 15 de junio de 2013.
43. <http://www3.inegi.org.mx/> Fecha de consulta: 15 de junio de 2013.
44. <http://www.siap.gob.mx/> Fecha de consulta: 15 de junio de 2013.
45. [http://www.agroder.com/Documentos/Publicaciones/Produccion\\_de\\_Maiz\\_en\\_Mexico-AgroDer\\_2012.pdf](http://www.agroder.com/Documentos/Publicaciones/Produccion_de_Maiz_en_Mexico-AgroDer_2012.pdf) Fecha de consulta: 17 de junio de 2013.
46. <http://www.sagarpa.gob.mx/agricultura> Fecha de consulta: 17 de junio de 2013.
47. <http://www.historicas.unam.mx/publicaciones/revistas/nahuatl/pdf/ecn42/887.pdf>. Fecha de consulta: 15 de junio de 2013.

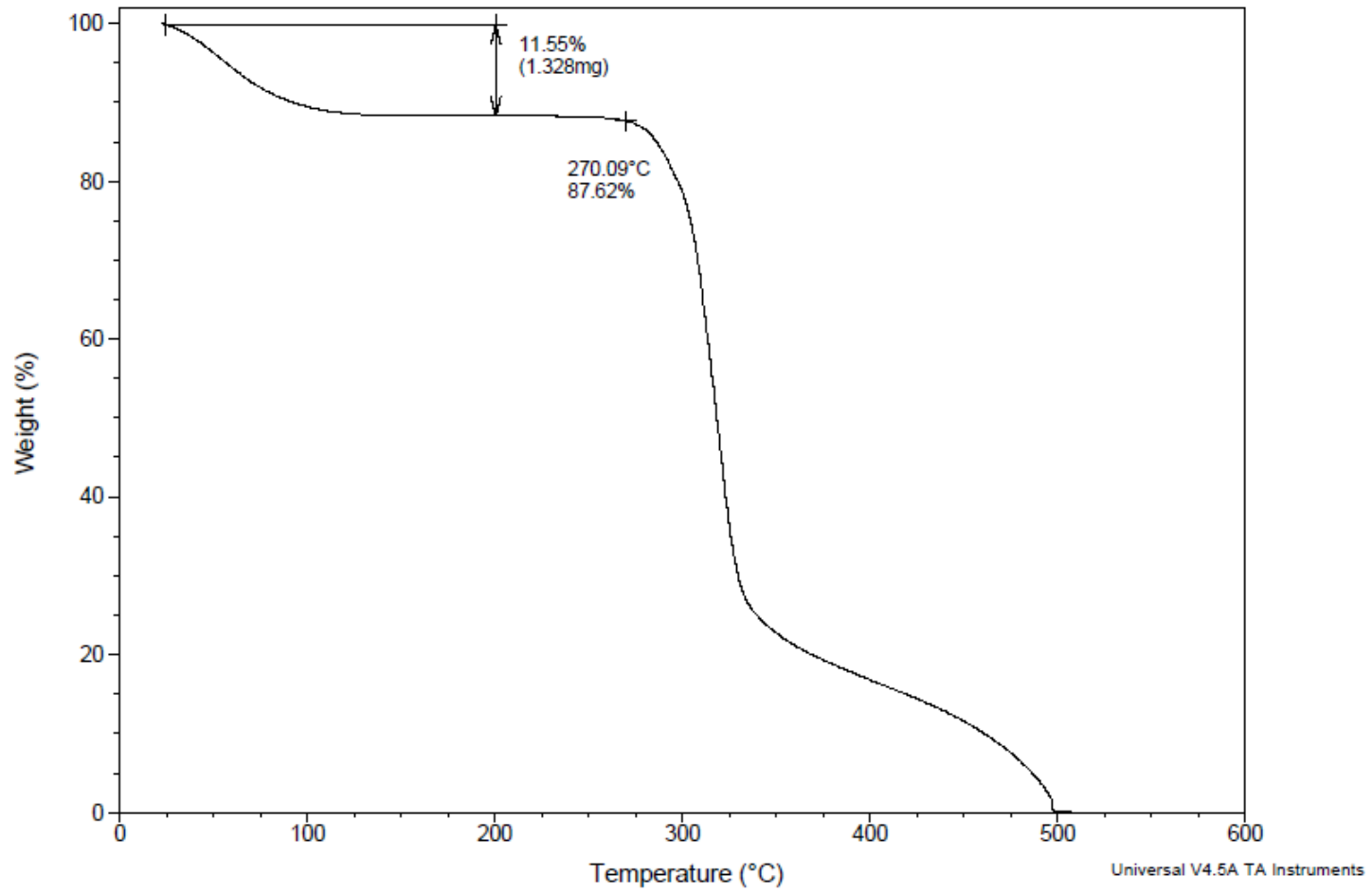
48. <http://www.envapack.com/polimeros-nuevos-a-base-del-acido-citrico/>.  
Fecha de consulta 30 junio 2013.
49. <http://www.chemspider.com/Chemical-Structure.29034.html> Fecha de consulta: 10 de Agosto de 2013-10-23
50. [http://docencia.izt.uam.mx/japg/RedVirtualJAP/CursoDRosado/4\\_Metabolismo/3-Aminoacidos/2-MetabolismodeAminoacidosCicloUrea.pdf](http://docencia.izt.uam.mx/japg/RedVirtualJAP/CursoDRosado/4_Metabolismo/3-Aminoacidos/2-MetabolismodeAminoacidosCicloUrea.pdf). Fecha de consulta: 10 de agosto 2013.
51. <http://microscopiaelectronicauami.com/sites/default/files/apuntes/uami.pdf>.  
Fecha de Consulta: 12 de agosto de 2013.
52. [http://www.proexport.es/Documentos/Proyectos/200942113394804.13.\\_Utilizaci%C3%B3n\\_de\\_pl%C3%A1sticos\\_biodegradables\\_para\\_la\\_agricultura.pdf](http://www.proexport.es/Documentos/Proyectos/200942113394804.13._Utilizaci%C3%B3n_de_pl%C3%A1sticos_biodegradables_para_la_agricultura.pdf). Fecha de consulta: 30 de agosto de 2013.
53. [http://www.instron.com.es/wa/solutions/astm\\_d638\\_tensile\\_properties\\_plastics.aspx?ref=https://www.google.com.mx](http://www.instron.com.es/wa/solutions/astm_d638_tensile_properties_plastics.aspx?ref=https://www.google.com.mx). Fecha de consulta: 05 de agosto, 2013.
54. <http://portal.veracruz.gob.mx/pls/portal/docs/PAGE/COVECAINICIO/IMAGENES/ARCHIVOSPDF/ARCHIVOSDIFUSION/YUCA2010.PDF>. Fecha de consulta: 07 de Julio, 2013.
55. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144861709002604>.  
Fecha de consulta: 08 de julio, 2013.
56. [http://www.revistavirtualpro.com/index/index.php?utm\\_campaign=website&utm\\_source=sendgrid.com&utm\\_medium=email](http://www.revistavirtualpro.com/index/index.php?utm_campaign=website&utm_source=sendgrid.com&utm_medium=email). Fecha de consulta: 24 de Julio, 2013.
57. [http://www.cyberphysics.co.uk/topics/forces/young\\_modulus.htm](http://www.cyberphysics.co.uk/topics/forces/young_modulus.htm). Fecha de consulta: 20 de Agosto, 2013.
58. [http://www.uwyo.edu/ces/pubs/b1183/\\_files/sodium\\_chloride.pdf](http://www.uwyo.edu/ces/pubs/b1183/_files/sodium_chloride.pdf). Fecha de consulta: 15 de Agosto, 2013
59. Mark, Herman F., Gaylord, Norman G., *Encyclopedia of polymers science and Technology Vol. II*, ed. John Wiley and Sons Inc, 1970, United State of America, pp. 847-851.





## 7. Apéndices.

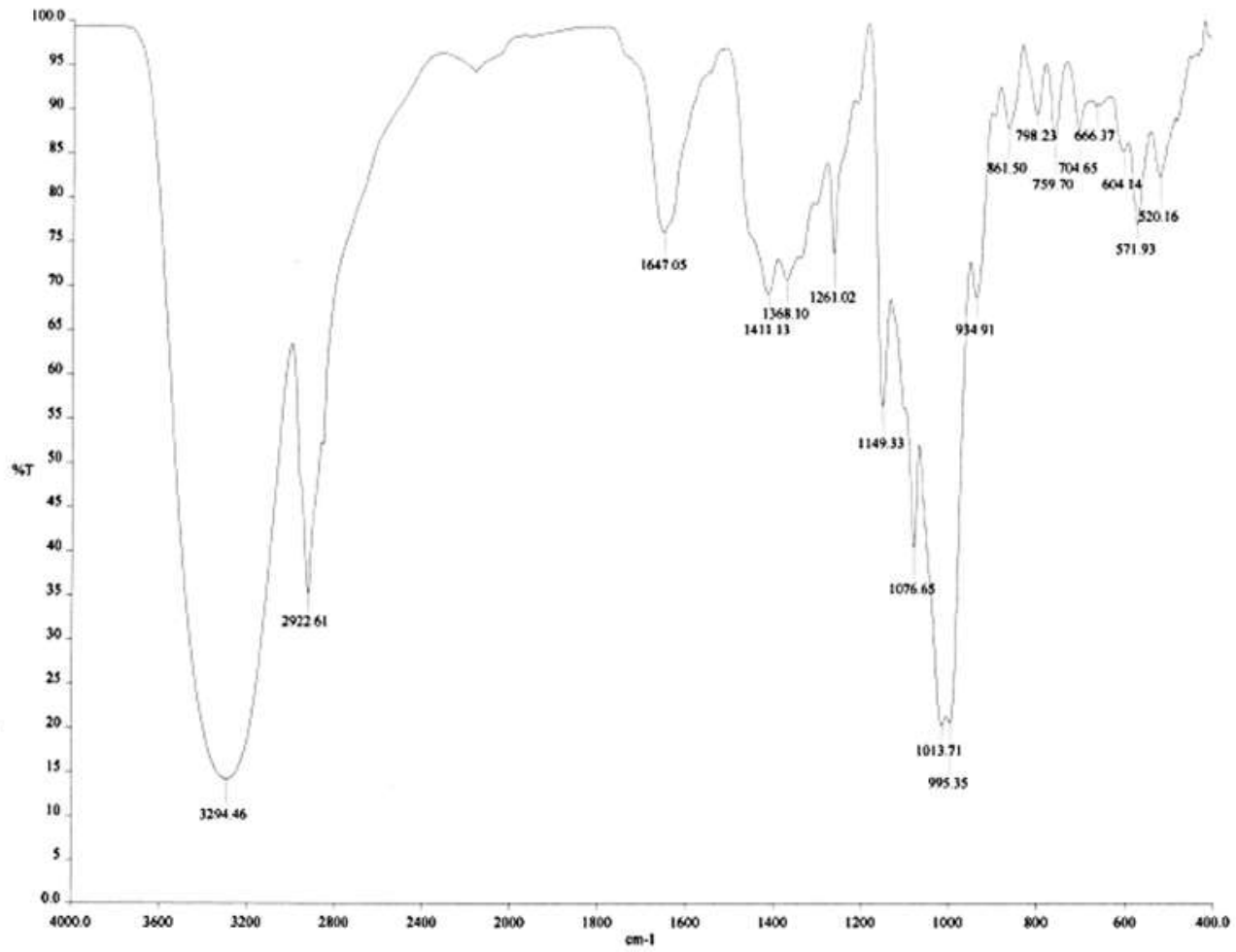
## Apéndice A. Termogavimetría.



TGA de Almidón de Maíz.



Apéndice B. Resultados de la Espectroscopia Infrarroja de TPS de maíz y yuca.



Espectro Infrarrojo para la muestra SATM104







