



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**ELABORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UNA PELÍCULA DE ALMIDÓN
TERMOPLÁSTICO DE YUCA (*Manihot esculenta*) REFORZADO CON MICROFIBRAS DE
CELULOSA EXTRAÍDA DE LA ESTOPA DEL COCO (*Cocos nucifera*) A ESCALA
LABORATORIO**

Diana Raquel Cermeño Dávila

Asesorado por la Inga. Adela María Marroquín González

Guatemala, marzo de 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ELABORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UNA PELÍCULA DE ALMIDÓN
TERMOPLÁSTICO DE YUCA (*Manihot esculenta*) REFORZADO CON MICROFIBRAS DE
CELULOSA EXTRAÍDA DE LA ESTOPA DEL COCO (*Cocos nucifera*) A ESCALA
LABORATORIO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

DIANA RAQUEL CERMEÑO DÁVILA
ASESORADO POR EL INGA. ADELA MARÍA MARROQUÍN GONZÁLEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, MARZO DE 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. César Alfonso García Guerra
EXAMINADOR	Ing. César Ariel Villela Rodas
EXAMINADOR	Ing. Sergio Alejandro Recinos
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**ELABORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UNA PELÍCULA DE ALMIDÓN
TERMOPLÁSTICO DE YUCA (*Manihot esculenta*) REFORZADO CON MICROFIBRAS DE
CELULOSA EXTRAÍDA DE LA ESTOPA DEL COCO (*Cocos nucifera*) A ESCALA
LABORATORIO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química con fecha 14 febrero de 2017.

Diana Raquel Cermeño Dávila

Guatemala 15 de julio de 2019

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela Ingeniería Química
Presente.

Estimado Ingeniero Álvarez:

Le saludo cordialmente, deseándole éxitos en sus actividades. Por medio de la presente hago constar que he revisado y aprobado el Informe Final del trabajo de graduación titulado: **"Elaboración y caracterización de una película de almidón termoplástico de yuca (*Manihot esculenta*) reforzado con microfibras de celulosa extraída de la estopa del coco (*Cocos nucifera*) a escala laboratorio"**, elaborado por la estudiante de la carrera de Ingeniería Química, Diana Raquel Cermeño Dávila, quien se identifica con el registro académico 201123049 y con el CUI 2348314560101.

Agradeciendo la atención a la presente, me suscribo de usted,

Atentamente,


Adela María Marroquín González
ASESOR

Ingeniero Químico
Colegiado activo no. 1446

Adela María Marroquín González
Ingeniera Química Col. No. 1446



Guatemala, 27 de enero de 2020.
Ref. EIQ.TG-IF.005.2020.

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el registro de evaluación, correlativo **077-2016**, le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL

Solicitado por el estudiante universitario: **Diana Raquel Cermeño Dávila**.
Identificado con número de carné: **2348314560101**.
Identificado con registro académico: **201123049**.
Previo a optar al título de la carrera: **Ingeniería Química**.
En la modalidad: **Informe Final, Seminario de Investigación**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

**ELABORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UNA PELÍCULA DE ALMIDÓN
TERMOPLÁSTICO DE YUCA (Manihot esculenta) REFORZADO CON MICROFIBRAS
DE CELULOSA EXTRAÍDA DE LA ESTOPA DEL COCO (Cocos nucífera) A ESCALA
LABORATORIO**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por:

Adela María Marroquín González, profesional de la Ingeniería Química

Habiendo encontrado el referido trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.



"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Hilda Piedad Palma Ramos de Martini

Hilda Piedad Palma Ramos de Martini
Profesional de la Ingeniería Química
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



ACAAI

Agencia Centroamericana de Acreditación de
Grados de Ingeniería y de Arquitectura





Ref.EIQ.TG.011.2020

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación, de la carrera de Ingeniería Química, de la estudiante, **DIANA RAQUEL CERMEÑO DÁVILA** titulado: **“ELABORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UNA PELÍCULA DE ALMIDÓN TERMOPLÁSTICO DE YUCA (*Manihot esculenta*) REFORZADO CON MICROFIBRAS DE CELULOSA EXTRAÍDA DE LA ESTOPA DEL COCO (*Cocos nucifera*) A ESCALA LABORATORIO”**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

“Id y Enseñad a Todos”



Ing. Williams G. Álvarez Mejía; M.I.Q., M.U.I.E
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, marzo de 2020

Cc: Archivo
WGAM/ale





USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Decanato
Facultad de Ingeniería
24189102 - 24189103

DTG. 108.2020

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **ELABORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UNA PELÍCULA DE ALMIDÓN TERMOPLÁSTICO DE YUCA (*Manihot esculenta*) REFORZADO CON MICROFIBRAS DE CELULOSA EXTRAÍDA DE LA ESTOPA DEL COCO (*Cocos nucifera*) A ESCALA LABORATORIO**, presentado por la estudiante universitaria: **Diana Raquel Cermeño Dávila**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Inga. Anabela Cordova Estrada

Decana

Guatemala, marzo de 2020

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por su infinita misericordia e intervención a lo largo de este viaje.
- Mis padres** Celerino de Jesús Cermeño Ramírez, Maira Amarilis Dávila Estrada de Cermeño por su apoyo incondicional, su comprensión, su amor, su perseverancia y su altruismo. Por lo que dejaron de ser para que yo fuera.
- Mis hermanas** Brenda Amarylys y Telma Lorena Cermeño Dávila por su ayuda, apoyo, amor y amistad. Las quiero mucho.
- Mis abuelos** Vicente Cermeño y Rosaura de Cermeño, que en paz descansen, gracias por compartir su tiempo y sabiduría conmigo. Vicente Dávila Cortez y Sofía Estrada Castillo gracias por el amor, apoyo y orgullo que me han expresado. Por ser todo lo que una nieta puede pedir.
- Mis primas** Vanesa y Sofía Cermeño, gracias por alivianar las cargas que conlleva cumplir esta meta.
- Mis tíos** Gracias por sus palabras de aliento, por su apoyo y comprensión. Por su confianza en mí.

Mi prima

Iris Rodríguez por ser ejemplo y guía para las que venimos atrás.

Mis primos

Por los momentos compartidos.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por darle a la juventud guatemalteca la oportunidad de adquirir los conocimientos necesarios para hacer un mejor país.
Facultad de Ingeniería	En especial al Área de Química General por prestar las instalaciones para la realización de este proyecto.
Escuela de Ingeniería Química	Por crear un pensum de estudios que permite el egreso de profesionales integrales.
Dra. Casta Zeceña	Por priorizar la academia, ser un ejemplo de mujer luchadora y darme una y mil oportunidades.
Inga. Adela Marroquín	Por creer en este proyecto e invertir su tiempo y su apoyo incondicional. Muchas gracias por todo.
Inga. Tannia de León	Por su apoyo y su ejemplo como profesional.
Profesores del Área de Química General	Gracias por ser ejemplo de profesionalismo, ética y por nunca negarse a compartir sus conocimientos.

**Mis amigos de la
Facultad de Ingeniería**

Gracias por las risas, los momentos compartidos, por ayudarme a crecer y crecer conmigo, por ser ejemplo de virtudes que deseo tener. Cada uno de ustedes tiene mi infinita admiración.

Área de Físicoquímica

Por prestar sus instalaciones y apoyar al futuro ingeniero químico.

**Área de Prefabricados
del Centro de
Investigaciones de la
Facultad de Ingeniería**

Por no negar el apoyo a una estudiante con deseo de superación.

Al pueblo de Guatemala

Este logro es de todos, por todos y para todos.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
HIPÓTESIS.....	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Polímeros	3
2.1.1. Polímeros termoplásticos y termoestables	3
2.1.2. Polímeros naturales.....	4
2.1.3. Polisacáridos	5
2.2. Celulosa y Almidón.....	6
2.2.1. Celulosa.....	7
2.2.2. Almidón.....	7
2.3. Coco	8
2.3.1. Taxonomía y morfología	8
2.3.2. Estopa de coco y celulosa	11
2.3.3. Hemicelulosa	12
2.3.4. Lignina	12
2.3.5. Pectinas.....	12
2.4. Yuca	12

2.4.1.	Taxonomía y morfología.....	13
2.4.2.	Procesado de yuca para almidón	15
2.4.3.	Almidón de yuca y sus características	16
2.4.4.	Almidón termoplástico	17
2.5.	Matriz de polímeros.....	18
2.5.1.	Mezcla de polímeros	19
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	21
3.1.	Variables	21
3.1.1.	Tiempo de agitación	21
3.1.2.	Temperatura.....	21
3.1.3.	Proporción entre almidón y celulosa	21
3.1.4.	Masa	22
3.1.5.	Tiempo de degradación.....	22
3.1.6.	Tamaño de fibra celulósica.....	22
3.1.7.	Tensión nominal	22
3.1.8.	Deformación nominal	22
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	23
3.2.1.	Localización.....	23
3.3.	Recursos humanos disponibles	24
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	24
3.4.1.	Equipo para la obtención de micro-celulosa a partir de la fibra de coco	24
3.4.2.	Equipo para la elaboración de la película de almidón termoplástico reforzado	24
3.4.2.1.	Cristalería	24
3.4.2.2.	Equipo Complementario	25
3.4.3.	Equipo para la caracterización mecánica de las películas de almidón termoplástico reforzado	25

3.4.4.	Equipo para caracterización del almidón termoplástico reforzado con micro-fibras de celulosa	26
3.4.4.1.	Reactivos y materia prima	26
3.5.	Técnica cuantitativa y cualitativa	26
3.5.1.	Técnica cuantitativa	26
3.5.2.	Técnica cualitativa	27
3.6.	Recolección y ordenamiento de información	28
3.6.1.	Preparación del almidón termoplástico	28
3.6.2.	Preparación del almidón termoplástico reforzado ...	30
3.6.3.	Ensayo de tracción	32
3.6.4.	Datos estadísticos	32
3.6.5.	Esquematización de la recolección y ordenamiento de los datos	32
3.7.	Tabulación y ordenamiento de la información	36
3.8.	Análisis estadístico	41
3.8.1.	Factores.....	41
3.8.2.	Tratamiento.....	42
3.8.2.1.	Análisis de varianza.....	42
3.8.3.	Plan de análisis de los resultados.....	44
3.8.3.1.	Métodos y modelos de los datos según tipo de variables.....	44
3.8.4.	Programas a utilizar	44
4.	RESULTADOS	46
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	53

CONCLUSIONES.....63
RECOMENDACIONES65
BIBLIOGRAFÍA.....67
APÉNDICES.....71

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Recolección de los de los datos para la preparación del hidrogel de almidón y su plastificación.....	33
2.	Preparación del almidón termoplástico	33
3.	Determinación de propiedades físicas de la película de almidón termoplástico reforzado con fibras de micro celulosa.....	34
4.	Degradación de las películas de almidón termoplástico en medio acuoso.....	35
5.	Análisis estadístico de los datos obtenidos	44
6.	Ensayo de tracción a tres probetas de una película de almidón termoplástico fabricada a partir de almidón nativo de yuca (<i>Manihot esculenta</i>).....	46
7.	Ensayo de tracción a tres probetas de una película de almidón termoplástico fabricada a partir de almidón nativo de yuca (<i>Manihot Esculenta</i>) con 5 % de microfibras de celulosa obtenida de la estopa del coco (<i>Cocos nucifera</i>) como refuerzo	47
8.	Ensayo de tracción a tres probetas de una película de almidón termoplástico fabricada a partir de almidón nativo de yuca (<i>Manihot Esculenta</i>) con 10 % de microfibras de celulosa obtenida de la estopa del coco (<i>Cocos Nucifera</i>) como refuerzo	48
9.	Ensayo de tracción a tres probetas de una película de almidón termoplástico fabricada a partir de almidón nativo de yuca (<i>Manihot Esculenta</i>) con 15 % de microfibras de celulosa obtenida de la estopa del coco (<i>Cocos Nucifera</i>) como refuerzo	49

10.	Caracterización de la tensión de rotura y tensión de rotura promedio de una película de almidón termoplástico con refuerzo de microfibras de celulosa en función de la cantidad presente de celulosa.....	50
11.	Caracterización de la deformación máxima por muestra y la deformación máxima promedio de películas de almidón termoplástico con refuerzo de micro fibras de celulosa en función de la cantidad presente de celulosa.....	51
12.	Porcentaje de degradación de una película de almidón termoplástico y películas de almidón termoplástico reforzadas con micro fibras de celulosa en 5 %, 10 % y 15 % respecto al contenido de almidón en base seca	52

TABLAS

I.	Análisis de variables	23
II.	Variables cualitativas y cuantitativas.....	28
III.	Composición de la película de almidón termoplástico	29
IV.	Proporción de la celulosa utilizada para reforzar una película de almidón termoplástico	31
V.	Preparación de almidón termoplástico en hidrogel, mezcla 1.....	36
VI.	Determinación de la cantidad de micro fibras de celulosa a utilizar a partir de la cantidad de almidón nativo de yuca utilizado	36
VII.	Preparación de almidón termoplástico en hidrogel, mezcla 2.....	36
VIII.	Preparación de almidón termoplástico en hidrogel, mezcla 3.....	37
IX.	Preparación de almidón termoplástico en hidrogel, mezcla 4.....	37
X.	Preparación de película de almidón termoplástico reforzado con microfibras de celulosa	37

XI.	Caracterización cualitativa de las propiedades de una película de almidón termoplástico reforzado con micro fibras de celulosa	38
XII.	Ensayo de tracción a una película de almidón termoplástico reforzado con microfibras de celulosa, mezcla 1.	38
XIII.	Ensayo de tracción a una película de almidón termoplástico reforzado con microfibras de celulosa, mezcla 2.	38
XIV.	Ensayo de tracción a una película de almidón termoplástico reforzado con microfibras de celulosa, mezcla 3.	39
XV.	Ensayo de tracción a una película de almidón termoplástico reforzado con microfibras de celulosa, mezcla 4.	39
XVI.	Tensión nominal de una película de almidón termoplástico reforzado con microfibras de celulosa, mezcla 1.	39
XVII.	Deformación nominal de una película de almidón termoplástico reforzado con microfibras de celulosa, mezcla 1.	41
XVIII.	Degradación en medio acuoso de una película de almidón termoplástico reforzado con microfibras de celulosa.....	41
XIX.	Descripción de la figura 6.....	46
XX.	Descripción de la figura 7.....	47
XXI.	Descripción de la figura 8.....	48
XXII.	Descripción de la figura 9.....	49
XXIII.	Descripción de la figura 10.....	50
XXIV.	Descripción de la figura 11.....	51
XXV.	Descripción de la figura 12.....	52

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
g	Aceleración de la gravedad.
A_c	Área de las caras de la probeta .
A_0	Área superficial antes de la deformación de la probeta.
ϵ	Deformación nominal.
E	Espesor de la probeta.
F	Fuerza soportada por el material.
g	Gramos.
kg	Kilogramos.
kPa	Kilo pascales.
L	Longitud de la probeta.
l_i	Longitud de la probeta al ser sometida a un esfuerzo.
l_0	Longitud de la probeta sin esfuerzo.
m_{AA}	Masa de ácido acético.
m_A	Masa de agua desmineralizada.
m_{Al}	Masa de almidón nativo de yuca (<i>Manihot esculenta</i>).
m_G	Masa de glicerina.
m_0	Masa de la muestra antes de la prueba de degradación en medio acuoso.
m_f	Masa de la muestra después de la prueba de degradación en medio acuoso.
m_C	Masa de microfibras de celulosa.

$m_{\mu f}$	Masa de microfibras de celulosa provenientes de la estopa de coco (<i>Cocos nucifera</i>).
Δm_d	Pérdida de masa por degradación del material en medio acuoso.
μf	Porcentaje de microfibras de celulosa presentes en el material.

GLOSARIO

Almidón termoplástico	Polímero de almidón que se ablanda por la acción del calor y se endurece al enfriarse.
Celulosa	Polímero natural abundante en la naturaleza.
Deformación máxima	Deformación del material justo antes del desgarro.
Deformación nominal	Relación entre la diferencia de longitud inicial y final después de aplicar esfuerzo y la longitud inicial.
Degradación	Descomposición de una molécula compleja a una más simple. Pérdida de átomos de carbono.
Microfibras	Fibra con diámetro del orden de 10 micras.
Polímero	Macromoléculas formadas por enlaces covalentes de una o más unidades llamadas monómeros.
Tensión de rotura	Tensión en la cual existe un desgarro.
Tensión nominal	Relación entre la fuerza soportada por la probeta de un material y el área anterior a la deformación del mismo.

RESUMEN

Se elaboró y caracterizó a escala laboratorio un almidón termoplástico utilizando almidón nativo de yuca (*Manihot esculenta*). A este material se aplicó un refuerzo con microfibras de celulosa provenientes de la estopa de coco (*Cocos nucifera*) en 5 %, 10 % y 15 % en masa del peso del almidón nativo con base seca.

Se formó el almidón termoplástico y el almidón termoplástico reforzado mediante la mezcla a una temperatura no mayor a 70 °C y agitación a 700 rpm del almidón con agua y glicerina como plastificantes, y ácido acético como estabilizador. El hidrogel obtenido de la mezcla se moldeó en películas de un pie cuadrado; las mismas fueron secadas en un horno de convección de 70 °C durante cinco horas. De las películas obtenidas se acondicionaron probetas para ser sometidas a ensayos de tracción y degradación en medio acuoso.

Mediante ensayos de tracción se obtuvieron las propiedades mecánicas del material. Dentro de las propiedades mecánicas se obtuvieron el módulo de elasticidad longitudinal, la tensión nominal, la deformación nominal, la tensión de rotura y deformación máxima del material. Se evaluó a través de un análisis de varianza si existe diferencia significativa entre las propiedades mecánicas del material al aumentar la cantidad de refuerzo de microfibras de celulosa presentes.

A través de la prueba de degradación, en medio acuoso del material, se calculó el porcentaje de degradación en forma de pérdida de masa y se analizó la varianza de los datos para determinar si existe diferencia significativa en la

pérdida de masa por degradación al variar la cantidad de refuerzo de microfibras de celulosa presente.

La caracterización de la tensión nominal en función de la deformación nominal evidenció que el material tiene un comportamiento elástico y no alcanzó el punto de deformación plástica. Se cuantificó la rigidez del material mediante el módulo de elasticidad longitudinal, el cual, aumentó a medida que se incrementó el refuerzo de microfibras de celulosa en las películas de almidón termoplástico.

No existió diferencia significativa en magnitud de la tensión de rotura soportada por el material al aumentar la presencia de refuerzo de microfibras de celulosa. Por el contrario, existió diferencia significativa entre la deformación máxima del material y la presencia de microfibras de celulosa como refuerzo, específicamente, existió una relación inversamente proporcional entre las mismas.

El refuerzo con microfibras de celulosa no retardó de forma significativa la degradación del material en un medio acuoso según lo evidenciado en el análisis estadístico realizado.

OBJETIVOS

General

Elaborar y caracterizar una película de almidón termoplástico de yuca (*Manihot esculenta*) reforzado con microfibras de celulosa extraída de la fibra del coco (*Cocos nucifera*) a escala laboratorio.

Específicos

1. Caracterizar las propiedades mecánicas de tensión en función de la deformación de películas de almidón termoplástico elaborado a partir de almidón nativo de yuca (*Manihot esculenta*) reforzado con microfibras de celulosa extraída de la estopa de coco (*Cocos nucifera*) en proporciones 0 %, 5 %, 10 % y 15 % de masa de celulosa con respecto a la masa del almidón con base seca.
2. Comparar la tensión de rotura máxima y la tensión rotura soportada por películas de almidón termoplástico elaborado a partir de almidón nativo de yuca (*Manihot esculenta*) reforzado con microfibras de celulosa extraída de la estopa de coco (*Cocos nucifera*) en proporciones 0 %, 5 %, 10 % y 15 % de masa de celulosa con respecto a la masa del almidón con base seca.
3. Contrastar la deformación máxima por muestra y la deformación máxima promedio de las películas de almidón termoplástico elaborado a partir de almidón nativo de yuca (*Manihot esculenta*) reforzado con microfibras de

celulosa extraída de la estopa de coco (*Cocos nucifera*) en proporciones 0 %, 5 %, 10 % y 15 % de masa de celulosa con respecto a la masa del almidón con base seca.

4. Analizar por medio de varianza si existe diferencia significativa en la tensión de rotura soportada por películas de almidón termoplástico elaborado a partir de almidón nativo de yuca (*Manihot esculenta*) reforzado con microfibras de celulosa extraída de la estopa de coco (*Cocos nucifera*) en proporciones 0 %, 5 %, 10 % y 15 % de masa de celulosa con respecto a la masa del almidón con base seca.
5. Determinar por medio de un análisis de varianza si existe diferencia significativa en la deformación máxima de las películas de almidón termoplástico elaborado a partir de almidón nativo de yuca (*Manihot esculenta*), reforzado con microfibras de celulosa extraída de la estopa de coco (*Cocos nucifera*) en proporciones 0 %, 5 %, 10 % y 15 % de masa de celulosa con respecto a la masa del almidón con base seca.
6. Calcular el porcentaje de degradación en un medio acuoso durante 72 horas de películas de almidón termoplástico elaborado a partir de almidón nativo de yuca (*Manihot esculenta*) reforzado con microfibras de celulosa extraída de la estopa de coco (*Cocos nucifera*) en proporciones 0 %, 5 %, 10 % y 15 % de masa de celulosa con respecto a la masa del almidón con base seca.

HIPÓTESIS

Hipótesis de Trabajo

El refuerzo de microfibras de celulosa a una película de almidón termoplástico mejora las propiedades mecánicas y retrasa la degradación en agua del material.

Hipótesis nula:

No existe diferencia significativa en las propiedades mecánicas y degradación de un almidón termoplástico reforzado con micro-celulosa cuando se varía la proporción almidón-microfibras de celulosa en 0 %, 5 %, 10 % y 15 % de masa de celulosa con respecto a masa del almidón con base seca.

$$\mu_1 = \mu_2 = 0$$

Hipótesis alternativa:

Existe diferencia significativa en las propiedades mecánicas y degradación de un almidón termoplástico reforzado con micro-celulosa cuando se varía la proporción almidón-microfibras de celulosa en 0 %, 5 %, 10 % y 15 % de masa de celulosa base seca con respecto a masa del almidón.

$$\mu_1 \neq \mu_2 \neq 0$$

INTRODUCCIÓN

El trabajo de investigación detalla los lineamientos para la elaboración y caracterización de una película de almidón termoplástico utilizando almidón nativo de yuca con microfibras de celulosa de la estopa de coco como refuerzo.

La degradación lenta de los polímeros sintéticos ha ocasionado acumulación de contaminación que afecta la biosfera del país. En cambio, los polímeros naturales se degradan con más facilidad gracias a la acción de microorganismos.

La creación de polímeros sintéticos derivó de la necesidad de imitar los polímeros naturales, mediante la implementación de nuevas técnicas se desarrollaron materiales más resistentes y baratos. En la actualidad, se busca manipular los materiales naturales para que tengan las características de los materiales sintéticos.

De los polímeros naturales se están desarrollando materiales como el almidón termoplástico, siendo el almidón el polímero natural más abundante en la tierra. El almidón termoplástico ha sido estudiado desde 1976 y una de las principales aplicaciones ha sido en la industria alimenticia. Se busca, ahora, mejorar sus características mecánicas para aplicaciones como en empaques y producción de materiales de plástico de uso convencional.

Otro de los polímeros más abundante es la celulosa, la misma posee características deseables en un material polímero, la más destacable es su inmiscibilidad en el agua. La investigación pretende determinar la factibilidad de

combinar las propiedades elásticas del almidón termoplástico con las propiedades cristalinas y de miscibilidad de la celulosa, así determinar si existe una mejora en las características físicas del material y de degradación.

1. ANTECEDENTES

La IUPAC define un biopolímero como un polímero emanado de un ser vivo. El almidón y la celulosa son los biopolímeros más abundantes en la naturaleza.

Entre las ventajas del uso de almidón como biopolímero se mencionan las numerosas y renovables fuentes de materia prima, la versatilidad, la biodegradabilidad y la competitividad económica; por otro lado, la celulosa es la biomolécula más abundante en la tierra, puesto que ocupa la mayor parte de la biomasa terrestre. Es reciclable, reutilizable y posee buenas propiedades de resistencia.

El almidón termoplástico fue desarrollado por primera vez en 1974 (Westhoff, Otey, Mehleretter y Russell). Se utilizaron plastificantes y aditivos para mejorar sus propiedades. A partir de los primeros estudios, se han realizado diversas investigaciones que buscan mejorar las propiedades y expandir el campo de aplicación del almidón termoplástico.

La celulosa tiene numerosas aplicaciones, siendo la más común en la industria papelera y textil. Sin embargo, se ha aprovechado muy poco en la industria guatemalteca como material polimérico.

Entre los estudios más relevantes acerca del almidón termoplástico existe el proyecto *Almidón termoplástico de yuca reforzado con fibra de fique* por Luna; Gabriela, Villada, Héctor; Velasco, Reinaldo de la Universidad Nacional de Colombia. En la investigación se obtuvo el almidón nativo de dos variedades

de yuca de la planta piloto de la Universidad del Cauca. A partir del mismo se realizó una película de almidón termoplástico y glicerol como plastificante reforzada con fibra de fique a diferentes proporciones. Las proporciones fueron caracterizadas mediante microscopía de alta resolución y calorimetría diferencial. También se caracterizaron sus propiedades mecánicas y se determinó cuál de las tres fue la mejor proporción.

Según Arévalo (2016) en su trabajo de grado *Elaboración de plástico biodegradable a partir del almidón extraído del maíz (Zea mays)*, para optar por el título de Ingeniera Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, tuvo como objetivo la elaboración de un plástico biodegradable. En este caso, el plástico también puede ser clasificado como un termoplástico. En la investigación también se dan los lineamientos para la elaboración de un polímero biodegradable a partir de almidón del maíz.

El proyecto de investigación *Films De Almidón Termoplástico. Influencia de la Incorporación de Hidroxipropil-Metil-Celulosa y Ácido Cítrico*, se investiga la factibilidad y la miscibilidad de ambos polímeros, así como la metodología (Ortega, Jiménez, Talens & Amparo, fecha).

Por otra parte, la investigación desarrollada por estudiantes de la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín, titulada *Películas de almidón de papa reforzadas con celulosa bacteriana*, resultó en un incremento en el módulo de elasticidad y el esfuerzo máximo respecto a una película de almidón termoplástico sin refuerzo. En el estudio mencionado, se trabajó a concentraciones de 2,5 %, 5,0 %, 7,5 % de celulosa base seca con respecto al peso del almidón (Echeverrú, Montoya, Zuluaga, Castro & Gañan, 2011).

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Polímeros

Se denomina polímeros a las macro moléculas conformadas por unidades moleculares llamados monómeros. Inicialmente, la síntesis de polímeros químicos se desarrolló con el fin de imitar los polímeros presentes en la naturaleza, creando compuestos de fácil producción y abaratando los materiales. El significado de la palabra polímero proviene del griego *poli*, muchos y *meros*, partes.

Existen diferentes tipos de polímeros. Se pueden clasificar en termoplásticos, termoestables y elastómeros. En la práctica los termoplásticos y los termoestables son llamados solamente plásticos.

Las propiedades de los polímeros, como en el caso de metales y cerámicas, están relacionadas con la estructura elemental del material. La mayoría de los polímeros son compuestos de carbono e hidrógeno enlazados mediante enlaces covalentes. El número de repeticiones de un monómero en una cadena de polímeros indica el grado de polimerización.

2.1.1. Polímeros termoplásticos y termoestables

Los polímeros termoplásticos se ablandan o se funden al calentarse a temperaturas elevadas y se endurecen de manera totalmente reversible. El proceso se puede repetir. La deformación a veces se logra con aplicación simultánea de calor y presión. A nivel molecular, a medida que la temperatura

aumenta, la fuerza de los enlaces secundarios se debilita (porque la movilidad aumenta) y esto facilita el movimiento relativo de las cadenas adyacentes al aplicar un esfuerzo.

Cuando la temperatura aumenta a niveles muy altos provoca degradación irreversible. Esta degradación se da por la rotura de enlaces covalentes ocasionada por las vibraciones violentas de las moléculas. El material ya no regresa a su forma original. Los polímeros termoplásticos son relativamente blandos y dúctiles (Callister, 1996).

2.1.2. Polímeros naturales

No existen diferencias físicas en el comportamiento, el estudio o el ensayo de polímeros sintéticos frente a los polímeros naturales.

Sin embargo, la física y la química de los polímeros sintéticos son mucho más complicadas que aquella de los polímeros naturales.

Las principales diferencias que se encuentran entre los polímeros naturales frente a los polímeros sintéticos parten de la composición de unidades de repeticiones diferentes; también, la mayor dependencia a las condiciones ambientales de su polímero natural, la estructura real del polímero en su entorno natural y la importancia de la forma y el tamaño de los polímeros naturales.

Los polímeros naturales pueden ser clasificados por su disponibilidad en la naturaleza.

Son de disponibilidad reducida: alcaloides, hemo, bilis y clorofilas, productos vegetales fenólicos, esteroides y taninos.

De disponibilidad media: aminoácidos, hongos, bacterias, lípidos, proteínas, purinas, pirimidinas, nucleótidos y ácidos nucleicos.

De alta disponibilidad: hidratos de carbono, aceites secantes, resinas alquídicas, ligninas, polisoprenos, proteínas, terpenos y terpenoides. (Seymour, y otros, 1995)

2.1.3. Polisacáridos

Los hidratos de carbono son los compuestos orgánicos más abundantes. Representan una tercera parte de la masa seca del mundo vegetal y un gran almacén de energía. Anualmente se producen 400 000 millones de toneladas de azúcares en la naturaleza.

Los polisacáridos son polímeros cuyos constituyentes (sus monómeros) son monosacáridos, los cuales se unen repetitivamente mediante enlaces glucosídicos. Estos compuestos llegan a tener un peso molecular muy elevado, que depende del número de residuos o unidades de monosacáridos que participen en su estructura. Este número es casi siempre indeterminado, variable dentro de unos márgenes, a diferencia de lo que ocurre con biopolímeros informativos, como el ADN o los polipéptidos de las proteínas, que tienen en su cadena un número fijo de piezas, además de una secuencia específica.

Los polisacáridos pueden descomponerse por hidrólisis de los enlaces glucosídicos entre residuos, en polisacáridos más pequeños, así como en

disacáridos o monosacáridos. Su digestión dentro de las células, o en las cavidades digestivas, consiste en una hidrólisis catalizada por enzimas digestivas (hidrolasas) llamadas genéricamente glucosidasas, que son específicas para determinados polisacáridos y, sobre todo, para determinados tipos de enlace glucosídico. Así, por ejemplo, las enzimas que hidrolizan el almidón, cuyos enlaces son del tipo llamado α (1 \rightarrow 4) no pueden descomponer la celulosa si sus enlaces son de tipo β (1 \rightarrow 4), aunque en los dos casos el monosacárido sea el mismo.

Las glucosidasas que digieren los polisacáridos, que pueden llamarse polisacaridasas, rompen, en general, uno de cada dos enlaces, liberando, de esta manera, disacáridos y dejando que otras enzimas completen luego el trabajo.

En la formación de cada enlace glucosídico «sobra» una molécula de agua, ya que estos se forman por reacciones de condensación a partir de la unión de monosacáridos por enlaces del tipo covalente. Asimismo, en su ruptura por hidrólisis se agrega una molécula de agua para dividirlo en múltiples monosacáridos, por lo que en una cadena hecha de n monosacáridos, habrá $n - 1$ enlaces glucosídicos.

2.2. Celulosa y almidón

El almidón y la celulosa son polisacáridos no iónicos encontrados abundantemente en la naturaleza. El almidón siendo un hidrato de carbono polimérico es soluble en medios hidrofílicos por sus propiedades de enroscamiento. La estructura de la celulosa, en cambio, es alargada, más rígida y cristalina, la cual requiere derivación para ser soluble en medios hidrofílicos.

2.2.1. Celulosa

La celulosa cumple funciones estructurales y no nutritivas en las plantas y vegetales. En un polímero no ramificado formado por residuos de glucosa unidos por enlaces β -1,4. La configuración β permite, a la celulosa, formar cadenas largas y rectas formando fibrillas, las cuales interactúan entre ellas mediante puentes de hidrógeno.

La celulosa tiene una estructura lineal o fibrosa en la que se establecen múltiples puentes de hidrógeno entre los grupos hidroxilo de distintas cadenas yuxtapuestas de glucosa, esto las hace muy resistentes e insolubles al agua. De esta manera, se originan fibras compactas que constituyen la pared celular de las células vegetales dándoles, así, la necesaria rigidez.

Las fibras de algodón, por ejemplo, tienen una longitud de 20-25 mm, las de pino 2-3 mm y las de eucalipto 0,6-0,8 mm, de igual manera, el contenido de celulosa varía según el tipo de árbol o planta que se considere.

2.2.2. Almidón

El almidón es el segundo polisacárido más abundante y se encuentra altamente distribuido en las plantas donde es almacenado como reserva de hidratos de carbono en las semillas, frutas, tubérculos, raíces y tallos. El almidón es un polímero polidisperso que se presenta como polímero lineal en el caso de la amilosa y como polímero de alta ramificación en el caso de la amilodextrina. Los almidones se encuentran habitualmente en forma de gránulos o agregados de polímeros unidos intramolecularmente mediante enlaces de hidrógeno.

El almidón comercial se puede obtener de diversas fuentes entre las cuales está la yuca o la, también denominada, tapioca. Un almidón nativo es aquel que ha sido extraído de fuentes naturales y no ha sido modificado.

El almidón nativo comercial es una mezcla de amilasa y amilopectina. En esta mezcla, la amilopectina es el componente que sirve como coloide protector y, por tanto, forma una suspensión en agua fría. En ausencia de amilopectina la amilasa formaría un gel rígido irreversible si se deja reposar en un proceso llamado retro degradación.

2.3. Coco

Es la palmera más cultivada e importante del mundo, ya que, actualmente, es la principal especie productora de grasa vegetal. Es una de las plantas que proporciona una mayor diversidad de productos al mundo, siendo una fuente primaria de alimento, bebida y de abrigo. La distribución de la palma de coco se extiende por la mayoría de las islas y de las costas tropicales y en algunos lugares fuera de la zona tropical. Su cultivo se localiza en Indonesia, India, Filipinas, Malasia, Centroamérica y África tropical.

El principal producto exportado es la copra sin procesar seguido del coco desecado. La diversidad y potencialidad del coco contribuye, de manera considerable, al sector económico de los países productores.

2.3.1. Taxonomía y morfología

- Taxonomía. Perteneciente a la familia *Arecaceae*, cuyo nombre científico es *Cocos nucifera* y conocido comúnmente como palma de coco.

- Origen. Probablemente sea nativa de las Islas del Pacífico y, actualmente, cultivada en todos los trópicos.
- Tronco. Es una palmera monoica de tronco único, con frecuencia inclinado. Mide 10 a 20 metros de altura y 50 centímetros de grosor en la base y estrechándose hacia la parte superior. En el ápice presenta un grupo de hojas que protegen el único punto de crecimiento o yema terminal que posee la planta.

Al no poseer el tronco tejido meristemático no engruesa, sin embargo, las variaciones en la disponibilidad de agua inducen cambios en el diámetro del tronco.

El crecimiento en altura depende de las condiciones ecológicas, de la edad de la planta y del tipo de cocotero.

- Hojas. Son pinnadas, de 1,5 a 4 metros de longitud, con folíolos coriáceos de 50 a 70 centímetros de longitud. Son de color verde amarillento.

En condiciones ambientales favorables una planta adulta de crecimiento gigante emite entre 12 a 14 hojas por año, en cambio, el enano puede emitir hasta 18 hojas en el mismo periodo.

La copa no es muy amplia y se compone de hasta 30 hojas arqueadas.

- Flores. Posee inflorescencias paniculadas que nacen en las axilas de las hojas inferiores, protegidas por una bráctea llamada espata que mide hasta 70 centímetros de longitud y se desarrolla en 3 o 4 meses.

La época de floración es de noviembre a marzo y los frutos tardan en madurar hasta 13 meses.

- Polinización. Puede ser anemófila o entomófila. En los cocoteros gigantes las flores masculinas se abren antes que las femeninas estén receptivas, lo cual contribuye a la polinización cruzada.

En el caso de los cocoteros enanos es simultánea, por tanto, hay un porcentaje alto de autofecundación.

- Fruto. Es una drupa, cubierto de fibras, de 20 a 30 centímetros de longitud con forma ovoidal, pudiendo llegar a pesar hasta 2,5 kilogramos.

Está formado por una cáscara externa amarillenta, correosa y fibrosa (exocarpo) de 4 o 5 centímetros de espesor con forma de pelos fuertemente adheridos a la nuez; una capa intermedia fina (mesocarpo) y otra más dura (endocarpo) que dispone de tres orificios próximos en disposición triangular, situados en el ápice, dos cerrados y el otro frente a la raicilla del embrión.

Es vulnerable a una pequeña presión y por donde puede derramarse el agua antes de romper la cáscara del fruto, y es donde se encuentra la semilla.

La pulpa blanca es comestible conteniendo en su cavidad central un líquido azucarado conocido como agua de coco y que en cantidad aproximada de 300 gramos se encuentra encerrada en el interior del fruto.

- Raíces. El sistema radicular es fasciculado. Las raíces primarias son las encargadas de la fijación de la planta y de la absorción de agua.

Las raíces terciarias derivan de las secundarias y son las verdaderas extractoras de nutrientes.

Las raíces activas se localizan en un radio de dos metros del tronco a una profundidad de entre 0,2 a 0,8 metros, dependiendo de la profundidad efectiva.

- Propagación. Los cocos frescos de la planta se entierran hasta la mitad con las cáscaras en un suelo húmedo. Si se mantiene una humedad constante estos comienzan a brotar en dos o tres meses, siendo, al principio, su crecimiento bastante lento hasta después de la maduración de la palma.

Debido a sus fuertes espinas desde la germinación, los animales no se alimentan de las plántulas.

2.3.2. Estopa de coco y celulosa

Es una fibra multicelular que tiene como principales componentes la celulosa y el leño, lo que la convierte en una fibra con buena rigidez y dureza. Es resistente al ataque de bacterias y al agua. Esta se obtiene de la estopa del coco.

Los componentes principales de la estopa de coco son la hemicelulosa, celulosa, lignina y pectina. (Atz, 2008)

De acuerdo con la investigación realizada por el ingeniero Fred Albán, del Departamento de Materiales de la Universidad del Valle y los estudiantes Hector Caviedes y Walter Rojas del Plan de Ingeniería Química de la misma Institución, la celulosa presente en la estopa de coco está cercana al 35 %.

2.3.3. Hemicelulosa

Se trata de una molécula con ramificaciones que permite el enlace con la pectina. Dichas ramificaciones ayudan a enlazarse con otros compuestos ofreciendo resistencia a presiones ejercidas. Está formada por más de un tipo de monómero y no tiene las características de cristalización que posee la celulosa.

2.3.4. Lignina

Está formada por la extracción irreversible del agua en los azúcares y cumple varias funciones dentro de la planta, por ejemplo, la protección contra ataque de microorganismos, así como dureza y resistencia. La lignina, por su naturaleza ramificada, no es un compuesto conveniente en el refuerzo de la película termoplástica, pues, podría formar enlaces covalentes con el resto de compuestos de los polímeros, dando al almidón termoplástico una rigidez y dureza indeseables.

2.3.5. Pectinas

Mezclas de polímeros ácidos y neutros que determinarán la rugosidad de la pared vegetal. Forman geles en presencia de agua. También presentan cargas que regulan el pH de la planta y el balance iónico.

2.4. Yuca

La yuca o mandioca es una especie de origen americano que se ha extendido en una amplia área de los trópicos americanos desde Venezuela y Colombia hasta el noroeste de Brasil, con predominio de los tipos de yuca dulce

en el norte y en la zona de Brasil los amargos. Según Rogers, 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.

La yuca constituye uno de los alimentos fundamentales, especialmente en aquellas zonas con déficit alimentario, gracias a su importante contenido proteico y energético.

2.4.1. Taxonomía y morfología

- Familia: *Euphorbiaceae*
- Género: *Manihot*
- Especie: *Manihot esculenta*
 - Planta. La yuca es un arbusto perenne de tamaño variable que puede alcanzar los 3 m de altura. Se pueden agrupar los cultivares en función de su altura: bajos (hasta 1,50 m), intermedios (1,50-2,50 m) y altos (más de 2,5 m).
 - Tallo. El tallo puede tener posición erecta, decumbente y acostada. Según la variedad, el tallo podrá tener ninguna, dos o tres, incluso más ramificaciones primarias, siendo el de tres ramificaciones el mayoritario en la yuca. Las variedades de ramificación alta, es decir, a más de 100 cm, facilitan las labores de escarda. El grosor del tallo se mide a 20 cm del suelo y puede ser delgado (menos de 2 cm de diámetro), intermedio (2 a 4 cm) y grueso (más de 4 cm). Al carácter del grosor del tallo se le ha asociado el alto rendimiento en raíces de reserva. Los entrenudos

pueden ser cortos (hasta 8 cm), medios (8 a 20 cm) y largos (más de 20 cm).

- Hojas. Son de forma palmipartida, con 5 a 7 lóbulos que pueden tener forma aovada o linear. Son simples, alternas, con vida corta y una longitud de 15 cm aproximadamente. Los peciolos son largos y delgados, de 20 a 40 cm de longitud y de un color que varía entre el rojo y el verde. La epidermis superior es brillante con una cutícula definida. Según la defoliación en la estación seca, las variedades de yuca se pueden retener algo de follaje, o gran parte de follaje (60 % aproximadamente).
- Flores. Es una especie monoica por lo que la planta produce flores masculinas y femeninas. Las flores femeninas se ubican en la parte baja de la planta y son menores en número que las masculinas, Mientras que las masculinas se encuentran en la parte superior de la inflorescencia. Las flores masculinas son más pequeñas.
- Sistema radicular. Comprende la corteza externa, la corteza media, la corteza interna y el cilindro central, estela, pulpa o región vascular. La corteza externa llamada también súber o corcho, corresponde un 0,5 a 2,0 % del total de la raíz. La industria del almidón prefiere aquellas variedades de adherencia débil. La corteza media está formada por felodermis sin esclerénquima. Posee un contenido en almidón bajo y en principios cianogénicos alto. Constituye un 9 a 15 % del total de la raíz.

La corteza interna está constituida por parte del parénquima de la corteza primaria, floema primario y secundario. Por último, el cilindro central está formado básicamente por el xilema secundario. La raíz reservante no tiene médula y pueden ser raíces de pulpa amarilla, crema y blanca. El rendimiento de raíces por planta suele ser de 1 a 3 kg, pudiendo llegar en óptimas condiciones hasta 5 a 10 kg/planta.

2.4.2. Procesado de yuca para almidón

- **Pesado:** se determina el contenido en almidón, así como el estado de la yuca.
- **Lavado y descascarado:** el descascarado no se realiza cuando se va a procesar harina integral para alimentación animal. El agua se trata con sulfato de aluminio para evitar que contenga óxido de hierro.
- **Selección:** la yuca pasa por una cinta transportadora en la que se eliminan las raíces dañadas o podridas no aptas para su procesado, así como aquellas con pedúnculos largos que podrían romper los cilindros ralladores.
- **Troceado y rallado o molido:** las raíces entran en un tambor en el que giran una serie de espas que las trocean. Se parten las raíces en trozos irregulares con la finalidad de facilitar el rallado de las mismas. La operación de rallado se lleva a cabo en los cilindros ralladores que desmenuzan la pulpa para así liberar los granos de almidón.

- Tamizado: tiene por objeto separar del almidón las partes fibrosas que representa un 10 a 12 % del producto. Se puede recuperar parte del almidón mediante un remolido y retamizado.
- Centrifugado: se lleva a cabo para separar los granos de almidón del líquido del que está en suspensión y de ciertas impurezas. Se añade agua potable, siempre teniendo en cuenta que no sea dura, puesto que dejaría oxalato de calcio en el producto final.
- Deshumidificación: en esta etapa la humedad se reduce hasta un 10 a 12 %.
- Clasificación: la masa de almidón obtenida se pulveriza mediante rodillos. Esta operación se realiza mediante un tamiz de 100 a 200 mallas por pulgada con el que se separan los grumos de almidón, las fibras y otras partículas. Dicho material vuelve a reprocesarse y se almacena en un lugar seco.
- Empaquetado: la harina finalmente se envasa en sacos de papel de cubiertas múltiples.

2.4.3. Almidón de yuca y sus características

El almidón de yuca nativo posee entre su composición una menor cantidad de amilosa que aquel modificado, lo que hace que el almidón de yuca nativo sea la mejor opción para la elaboración de polímeros termoplásticos.

Los gránulos de almidón de la yuca pueden variar de 5 μm a 35 μm y se estima que el contenido de amilosa está alrededor del 17 %.

Una de las principales propiedades del almidón nativo es su semicristalinidad, donde la amilopectina es el componente dominante de la cristalización en la mayoría de los almidones. La porción cristalina está compuesta por estructuras de doble hélice formadas por puentes de hidrógeno entre los grupos hidroxilo en las cadenas lineales de la molécula de amilopectina y por cadenas externas de amilopectina unidas con porciones de amilosa.

2.4.4. Almidón termoplástico

Algunas de las características más destacables del almidón termoplástico incluyen su compatibilidad con el medio ambiente, biodegradabilidad, material renovable y facilidad de incorporación como abono orgánico.

El almidón termoplástico se obtiene por la interrupción estructural del gránulo de almidón en solución acuosa bajo la aplicación de energía térmica y fuerzas mecánicas, esto con ayuda de plastificantes de baja volatilidad resistentes a temperaturas medianamente altas (Investigación de Almidones Termoplásticos, Precursores de Productos Biodegradables, 2008).

Para la formación de un termoplástico a partir de un almidón nativo es necesario romper y fundir la estructura micro-cristalina original. Se han desarrollado varios métodos para elaborar termoplásticos de almidón.

El agua y el glicerol son los plastificantes utilizados comúnmente. La lubricación que los mismos brindan facilita la movilización de las cadenas poliméricas. Además, retardan la retrogradación de los productos termoplastificados. Un contenido de agua excesivo, sin embargo, facilita la cristalización de las cadenas de polímero por la presencia de grupos hidroxilo,

esta retro-degradación afecta el material de manera que su actuación mecánica se ve severamente comprometida.

2.5. Matriz de polímeros

La necesidad de reducir peso e incrementar la funcionalidad, combinada con mínimo mantenimiento en automoción, aeronáutica y otras aplicaciones ha permitido el desarrollo de los plásticos reforzados con fibras. Estos materiales se caracterizan por una alta resistencia y rigidez y por su bajo peso. Propiedades que resultan ser superiores, en muchos casos, a las de los materiales metálicos. Adicionalmente, la relación entre la resistencia a la fatiga y el peso es excelente. Por tanto, estos materiales han remplazado a los convencionales como componentes resistentes o estructurales en un gran número de aplicaciones.

El secreto de los materiales compuestos reside en la elección de un sistema de matriz adecuado y su asociación con fibras de refuerzo, obteniéndose como resultado un nuevo material con cualidades diferentes, que no son alcanzables por cada uno de los materiales predecesores de manera aislada.

Los materiales compuestos de matriz polimérica combinan una matriz plástica con fibras de vidrio o de carbono. Sus atractivas propiedades los hacen ser competitivos con otros materiales del mercado.

Es el esfuerzo fibroso el que consigue dotar al material compuesto de la resistencia mecánica adecuada. Mientras que la matriz aporta elasticidad, resistencia química y térmica y, sobre todo, bajo peso. Raras veces los refuerzos se presentan en forma de partículas. Lo normal es que se trate de

fibras que pueden ser cortas según las prestaciones exigidas al material resultante.

2.5.1. Mezcla de polímeros

Se refiere al término global para mezclas de homopolímeros o copolímeros.

Existen diferentes clasificaciones de mezclas de polímeros:

- Mezclas homólogas de polímeros: mezcla del mismo polímero con distinta masa molar.
- Aleación de polímeros: una sub clase de polímeros reservada para mezclas poliméricas con morfologías estabilizadas.
- Mezcla de polímeros miscibles: mezclas que evidencian una sola fase.
- Mezcla de polímeros inmisible: presentan dos o más fases bajo cualquier condición de mezcla.
- Mezclas parcialmente miscibles de polímeros: aquellos que solo son miscibles bajo ciertas condiciones.
- Mezclas de polímeros compatibles: indican materiales comercialmente útiles. Mezcla de polímeros sin fuerzas repulsivas que a simple vista parecen ser homogéneos.

- Red interpenetrante de polímeros: mezcla de dos polímeros donde ambos componentes forman fases continuas y, al menos uno de ellos, se sintetiza en presencia del otro.

La mayor parte de mezcla de polímeros se prepara en la industria mediante mezclas mecánicas, debido al bajo costo y simplicidad del método. Se combina mediante agitadores de tornillo o extractores.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Las variables a estudiar en este trabajo de investigación son las siguientes:

3.1.1. Tiempo de agitación

El tiempo de agitación dependerá de la gelatinización del almidón termoplástico.

3.1.2. Temperatura

La temperatura se mantendrá menor a los 100 °C para no degradar las propiedades del almidón termoplástico.

3.1.3. Proporción entre almidón y celulosa

Se trabajará con diferentes proporciones de almidón termoplástico y refuerzo de celulosa. La proporción almidón-microfibras de celulosa en 0 %, 5 %, 10 % y 15 % de masa de celulosa base seca con respecto a masa del almidón.

3.1.4. Masa

Se determinará el cambio de masa de la película de almidón termoplástico antes y después de un período de tiempo en degradación en medio húmedo.

3.1.5. Tiempo de degradación

Se determinará el cambio de masa de la película de almidón termoplástico reforzado con micro celulosa en función del tiempo.

3.1.6. Tamaño de fibra celulósica

Se determinará el tamaño de la fibra con la que se trabajará.

3.1.7. Tensión nominal

Se determinará la fuerza aplicada que soporta una probeta de la película del almidón termoplástico hasta su rotura sobre su área superficial inicial.

3.1.8. Deformación nominal

Se determinará la deformación que soporta una probeta de la película del almidón termoplástico hasta su rotura respecto a su forma original.

Tabla I. **Análisis de variables**

Núm.	Variable	Dimensional	Factor potencial de estudio		Factores perturbadores	
			Independiente	Dependiente	Controlable	No controlable
1	Proporción de microfibras de celulosa	g/g	X		X	
2	Temperatura	°C	X		X	
3	Tiempo de secado	h		X		X
4	Tiempo de plastificación	min		X		X
5	Deformación	%		X		X
6	Tensión nominal	kPa		X		
7	Masa	g		X	X	
8	Tiempo de degradación	días		X		X
9	Esfuerzo	(kg/m ²)	X			X
10	Color	--	X			X
11	Textura	--	X			X
12	Transparencia	--	X			X

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación del campo de estudio

Se realizará la caracterización física y cualitativa de una película de almidón termoplástico reforzado con celulosa a escala laboratorio. La degradación en medio acuoso se realizará dentro de un período de 7 días.

3.2.1. Localización

La síntesis del almidón termoplástico reforzado con celulosa de la estopa de coco se llevará a cabo en el Laboratorio de Química General del edificio T5 de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala y en el Área de Tecnología de la Madera en el Centro de Investigaciones de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

La caracterización física se llevará a cabo en el Área de Materiales Prefabricados del Centro de Investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala. En donde se obtendrán los análisis

de las propiedades mecánicas de la película de almidón termoplástico reforzado con celulosa.

3.3. Recursos humanos disponibles

- Investigadora: Diana Raquel Cermeño Dávila
- Asesora: Inga. Adela Marroquín
- Área de Materiales Prefabricados: Ing. Mario Corzo (coordinador)

3.4. Recursos materiales disponibles

A continuación, se describen los recursos materiales disponibles.

3.4.1. Equipo para la obtención de micro-celulosa a partir de la fibra de coco

- Molino Wiley

3.4.2. Equipo para la elaboración de la película de almidón termoplástico reforzado

A continuación, se describe el equipo utilizado para la elaboración de la película de almidón termoplástico reforzado.

3.4.2.1. Cristalería

- *Beaker*
- Probeta
- Vidrio de reloj

- Termómetro
- Varilla de agitación

3.4.2.2. Equipo complementario

- Plancha de calentamiento y agitación
- Agitador magnético
- Balanza
- Molde de silicón
- Horno de convección

3.4.3. Equipo para la caracterización mecánica de las películas de almidón termoplástico reforzado

- Mesa metálica
- Sargentos
- Mordazas de madera
- Abrazadera
- Cable acerado de 7 hilos con recubrimiento de vinil
- Cable acerado de 7 hilos
- Polea de 1 pulgada
- Balanza
- Bloques de concreto para pesos controlado
- Regla metálica
- Platinas
- Vernier

3.4.4. Equipo para caracterización del almidón termoplástico reforzado con micro-fibras de celulosa

A continuación, se describe el equipo utilizado para caracterización del almidón termoplástico reforzado con micro-fibras de celulosa.

3.4.4.1. Reactivos y materia prima

- Agua desmineralizada.
- Fibra de estopa de coco obtenida del procesamiento de la estopa de coco.
- Almidón de yuca nativo sin aditivos.
- Glicerina grado USP.
- Ácido acético grado USP.

3.5. Técnica cuantitativa y cualitativa

A continuación, se describen las técnicas cuantitativa y cualitativa.

3.5.1. Técnica cuantitativa

Para la elaboración del almidón termoplástico se utilizarán diferentes proporciones de microfibras de celulosa obtenida a partir de la estopa de coco.

Las proporciones de microfibras de celulosa respecto a la cantidad de almidón se determinaron en 0 %, 5 %, 10 %, y 15 % basándose en antecedentes del estudio *Films de almidón termoplástico influencia de la incorporación de hidroxipropil-metil-celulosa y ácido cítrico*, 2014. Dichas proporciones se encuentran en un rango aceptable para la observación del

comportamiento de las características físicas del almidón termoplástico sin y con refuerzo. La degradación en medio acuoso se hará mediante el sumergimiento de la película de almidón termoplástico en agua corriente. Se cuantificará la pérdida de masa en un período de 7 días para cada una de las muestras correspondientes.

Se determinará el tiempo de plastificación de almidón a temperatura y presión constante. También se determinará el tiempo de secado de las películas de almidón termoplástico reforzado con microfibras de celulosa en cada una de las proporciones establecidas.

Se realizará una prueba de esfuerzo para caracterizar las propiedades físicas del almidón termoplástico y se determinará, por medios estadísticos, la relación entre la proporción de microfibras de celulosa del coco, tanto sus propiedades físicas y de degradación.

3.5.2. Técnica cualitativa

Se determinarán características cualitativas del almidón termoplástico reforzado con micro celulosa antes y después de la degradación. Las características son: color, transparencia y textura.

Tabla II. **Variables cualitativas y cuantitativas**

Núm.	Variable	Cualitativa	Cuantitativa
1	Proporción de microfibras de celulosa		X
3	Temperatura		X
4	Presión		X
5	Tiempo de secado		X
6	Tiempo de plastificación		X
7	Deformación		X
8	Masa		X
9	Tiempo de degradación		X
10	Esfuerzo		X
11	Color	X	
12	Textura	X	
13	Transparencia	X	

Fuente: elaboración propia.

3.6. **Recolección y ordenamiento de información**

A continuación, se presenta la recolección y ordenamiento de información.

3.6.1. **Preparación del almidón termoplástico**

Se tomará nota de las condiciones bajo las cuales se prepara el almidón termoplástico, tanto de la temperatura y el tiempo de agitación.

Se determinará el tiempo de secado de las películas de almidón termoplástico.

Tabla III. **Composición de la película de almidón termoplástico**

Reactivo	Concentración porcentual en masa [%]
Agua	72,7 %
Almidón nativo de yuca	17,3 %
Glicerina grado USP (plastificante)	8,5 %
Ácido acético 5 %	1,5 %

Fuente: elaboración propia.

- Preparar el almidón nativo de yuca y la glicerina conforme a la composición establecida en la Tabla III. mediante una mezcla a temperatura ambiente y reposar 30 minutos.
- Agregar agua de acuerdo a la composición establecida y homogenizar la mezcla.
- Agregar ácido acético de acuerdo a la composición establecida.
- Calentar en una plancha de calentamiento y agitación a 80 °C. Agitar con un agitador magnético a 700 rpm.
- Monitorear la temperatura.
- Dejar de agitar con el agitador magnético cuando la mezcla alcance los 65°C y disminuir la temperatura de la plancha a 75 °C.
- Agitar con varilla de agitación durante 30 segundos y dejar reposar durante 30 segundos hasta completar la gelatinización de la mezcla.

- Una vez el hidrogel esté transparente, dejar de calentar y reposar durante 15 segundos.
- Trasladar el hidrogel a un molde de silicón y expandir hasta cubrir un área de 30 cm².
- Uniformar el espesor de la película a 1 cm con una moldeadora de vidrio.
- Secar en el horno de convección durante 5 horas a una temperatura de 70 °C.
- Retirar del horno de convección. Esperar que la película alcance la temperatura ambiente.
- Retirar la película del molde de silicón.
- Preparar las probetas para ensayo de tracción.

3.6.2. Preparación del almidón termoplástico reforzado

A continuación, se presenta la preparación del almidón termoplástico reforzado.

Tabla IV. **Proporción de la celulosa utilizada para reforzar una película de almidón termoplástico**

Mezcla	Concentración porcentual en masa de celulosa respecto a la masa utilizada de almidón nativo con base seca [%]
Mezcla 2	5 %
Mezcla 3	10 %
Mezcla 4	15 %

Fuente: elaboración propia.

- Agregar la celulosa de acuerdo a la composición establecida en la tabla IV.
- Calentar en una plancha de calentamiento y agitación a 80 °C y agitar con un agitador magnético a 700 rpm.
- Monitorear la temperatura.
- Dejar de agitar con el agitador magnético cuando la mezcla alcance los 65 °C y disminuir la temperatura de la plancha a 75 °C.
- Agitar con varilla de agitación durante 30 s y dejar reposar durante 30 s hasta completar la gelatinización de la mezcla.
- Una vez el hidrogel esté transparente, dejar de calentar y reposar durante 15 s.
- Trasladar el hidrogel a un molde de silicón y expandir hasta cubrir un área de 30 cm².

- Uniformar el espesor de la película a 1 cm con una moldeadora de vidrio.
- Secar en el horno de convección durante 5 horas a una temperatura de 70 °C.
- Retirar del horno de convección. Esperar que la película alcance la temperatura ambiente.
- Retirar la película del molde de silicón.
- Preparar las probetas para ensayo de tracción.

3.6.3. Ensayo de tracción

Se realizará un ensayo de tracción para determinar la deformación nominal y la tensión nominal.

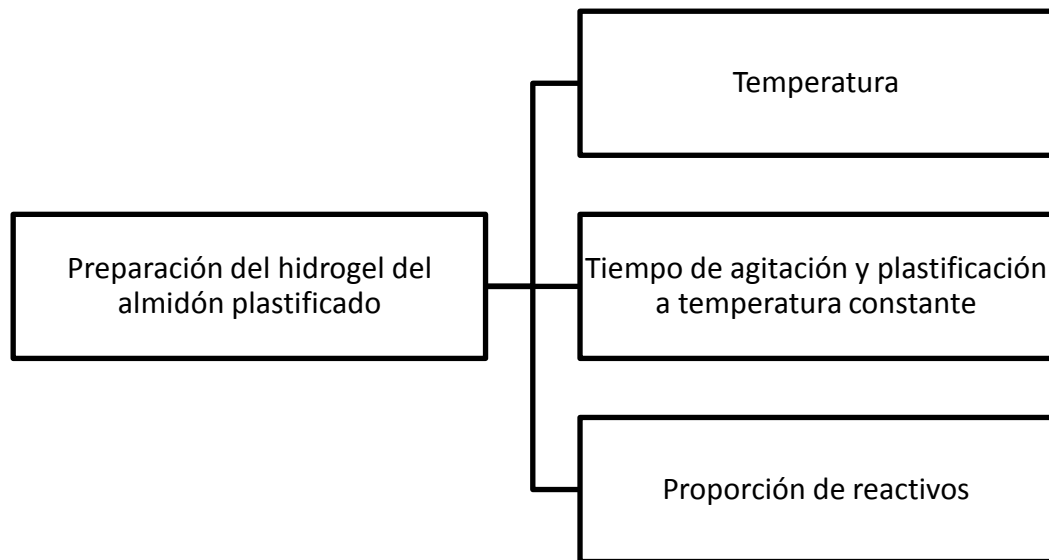
3.6.4. Datos estadísticos

A continuación se describen los datos estadísticos.

3.6.5. Esquematización de la recolección y ordenamiento de los datos

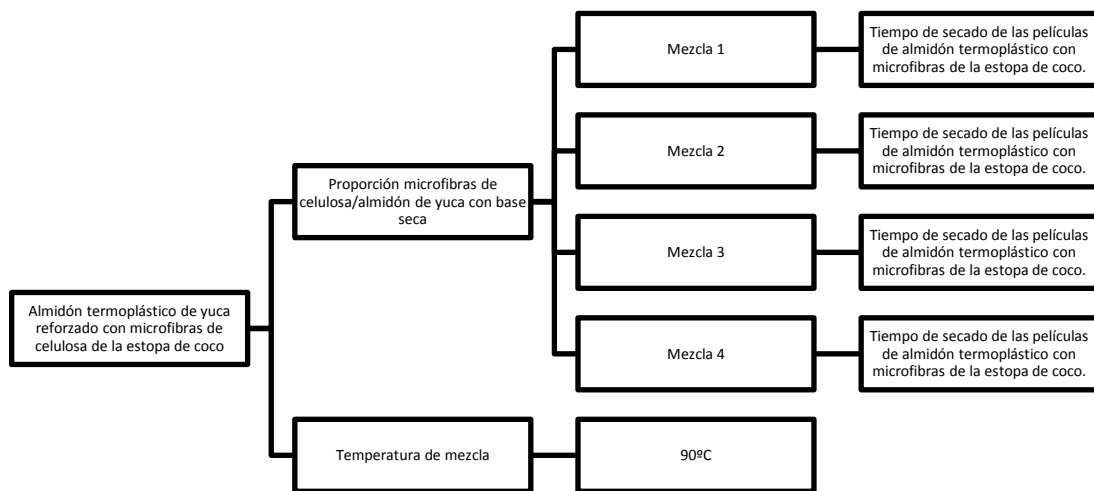
A continuación, se presenta la recolección de los de los datos para la preparación del hidrogel de almidón y su plastificación.

Figura 1. **Recolección de los de los datos para la preparación del hidrogel de almidón y su plastificación**



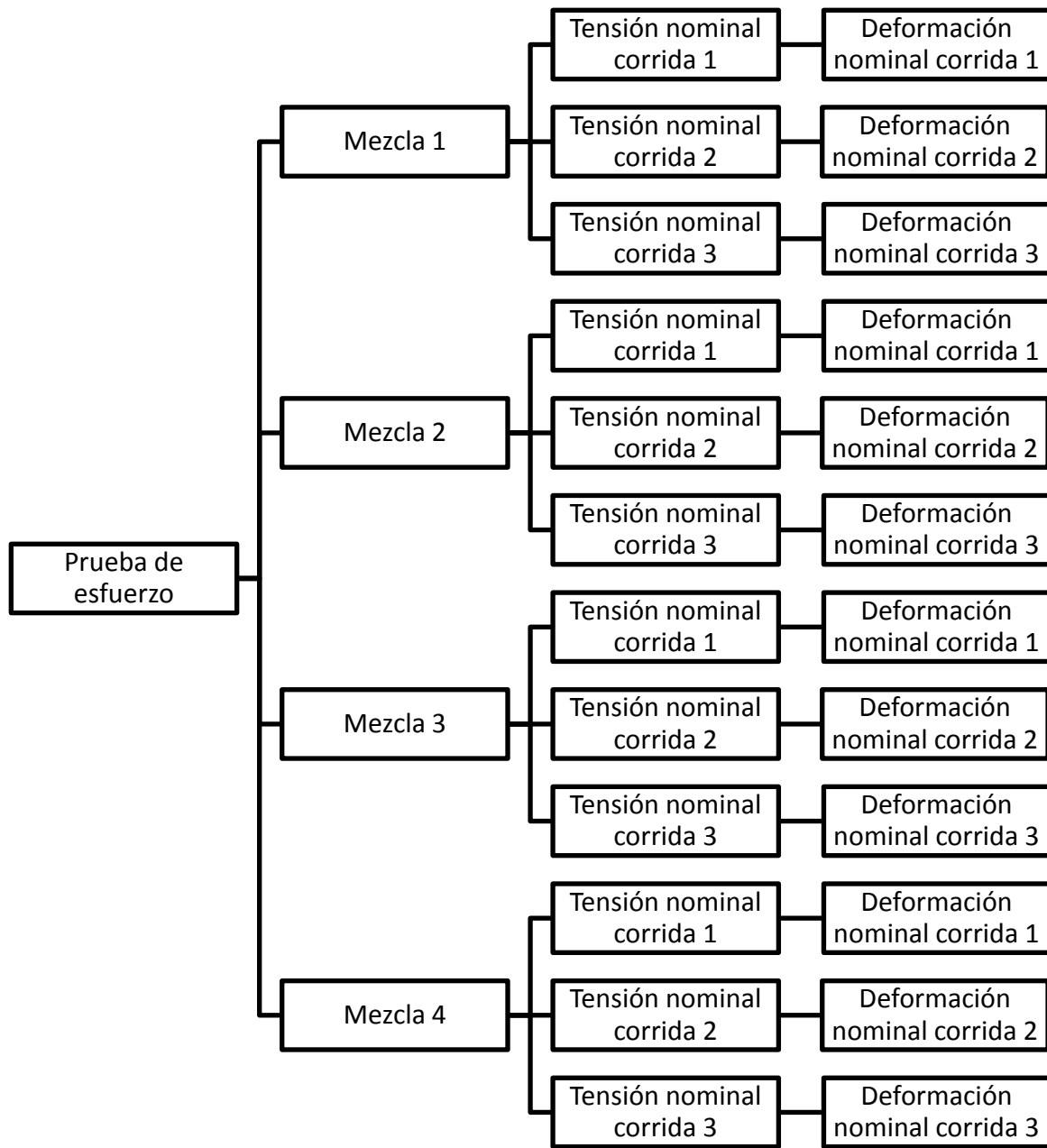
Fuente: elaboración propia.

Figura 2. **Preparación del almidón termoplástico**



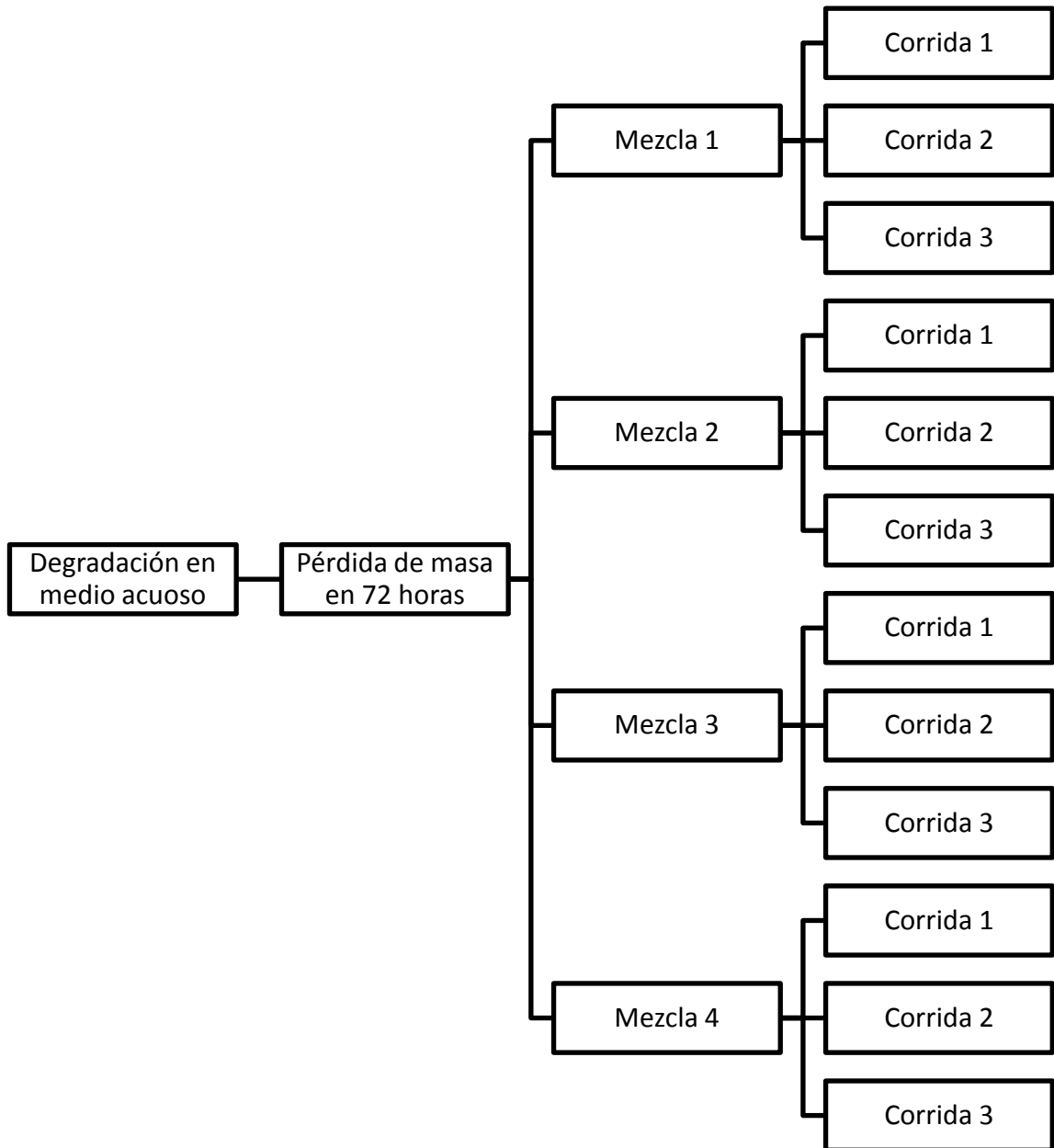
Fuente: elaboración propia.

Figura 3. **Determinación de propiedades físicas de la película de almidón termoplástico reforzado con fibras de micro celulosa**



Fuente: elaboración propia.

Figura 4. **Degradación de las películas de almidón termoplástico en medio acuoso**



Fuente: elaboración propia.

3.7. Tabulación y ordenamiento de la información

A continuación, se presenta la tabulación y ordenamiento de la información.

Tabla V. **Preparación de almidón termoplástico en hidrogel, mezcla 1**

Reactivos		Condiciones de preparación	
Reactivo	Cantidad	Propiedades	Medida
Almidón nativo de yuca	[g]	Masa	[g]
Glicerina	[g]	Temperatura máxima	[°C]
Ácido acético	[g]	Tiempo de agitación	[min]
Agua destilada	[g]	Volumen	[ml]

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Determinación de la cantidad de micro fibras de celulosa a utilizar a partir de la cantidad de almidón nativo de yuca utilizado**

Componente	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4
	Cantidad	Cantidad	Cantidad	Cantidad
Almidón nativo de yuca	[g]	[g]	[g]	[g]
Microfibras celulosa	[g]	[g]	[g]	[g]

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Preparación de almidón termoplástico en hidrogel, mezcla 2**

Reactivos		Condiciones de preparación	
Reactivo	Cantidad	Propiedades	Medida
Almidón nativo de yuca	[g]	Masa	[g]
Glicerina	[g]	Temperatura máxima	[°C]
Ácido acético	[g]	Tiempo de agitación	[min]

Agua destilada	[g]	Volumen	[ml]
Micro fibras de la estopa de coco			

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Preparación de almidón termoplástico en hidrogel, mezcla 3**

Reactivos		Condiciones de preparación	
Reactivo	Cantidad	Propiedades	Medida
Almidón nativo de yuca	[g]	Masa	[g]
Glicerina	[g]	Temperatura máxima	[°C]
Ácido acético	[g]	Tiempo de agitación	[min]
Agua destilada	[g]	Volumen	[ml]
Micro fibras de la estopa de coco			

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Preparación de almidón termoplástico en hidrogel, mezcla 4**

Reactivos		Condiciones de preparación	
Reactivo	Cantidad	Propiedades	Medida
Almidón nativo de yuca	[g]	Masa	[g]
Glicerina	[g]	Temperatura máxima	[°C]
Ácido acético	[g]	Tiempo de agitación	[min]
Agua destilada	[g]	Volumen	[ml]
Micro fibras de la estopa de coco			

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Preparación de película de almidón termoplástico reforzado con microfibras de celulosa**

Componente	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4
Temperatura de secado	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
Tiempo de secado de película	[h]	[h]	[h]	[h]

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Caracterización cualitativa de las propiedades de una película de almidón termoplástico reforzado con micro fibras de celulosa**

Mezcla	Color	Textura	Transparencia
1			
2			
3			
4			

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Ensayo de tracción a una película de almidón termoplástico reforzado con microfibras de celulosa, mezcla 1**

n	Probeta 1		Probeta 2		Probeta 3	
	Peso controlado	Elongación	Peso controlado	Elongación	Peso controlado	Elongación
1						
2						
3						
n						

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Ensayo de tracción a una película de almidón termoplástico reforzado con microfibras de celulosa, mezcla 2**

n	Probeta 1		Probeta 2		Probeta 3	
	Peso controlado	Elongación	Peso controlado	Elongación	Peso controlado	Elongación
1						
2						

3						
n						

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. Ensayo de tracción a una película de almidón termoplástico reforzado con microfibras de celulosa, mezcla 3

n	Probeta 1		Probeta 2		Probeta 3	
	Peso controlado	Elongación	Peso controlado	Elongación	Peso controlado	Elongación
1						
2						
3						
n						

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. Ensayo de tracción a una película de almidón termoplástico reforzado con microfibras de celulosa, mezcla 4

n	Probeta 1		Probeta 2		Probeta 3	
	Peso controlado	Elongación	Peso controlado	Elongación	Peso controlado	Elongación
1						
2						
3						
n						

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. Tensión nominal de una película de almidón termoplástico reforzado con microfibras de celulosa, mezcla 1

Mezcla	Tensión nominal máxima	Tensión nominal promedio
1		
2		
3		
4		

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Deformación nominal de una película de almidón termoplástico reforzado con microfibras de celulosa, Mezcla 1**

Mezcla	Deformación nominal máxima	Deformación nominal promedio
1		
2		
3		
4		

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Degradación en medio acuoso de una película de almidón termoplástico reforzado con microfibras de celulosa**

Tiempo: 7 días	Mezcla 1		Mezcla 2		Mezcla 3		Mezcla 4	
	Masa inicial	Masa final	Masa inicial	Masa final	Masa inicial	Masa final	Masa inicial	Masa final
Corrida								
1								
2								
3								

Fuente: elaboración propia.

3.8. Análisis estadístico

A continuación, se describe el análisis estadístico.

3.8.1. Factores

Se trabajará un factor, el cual consiste en la proporción de microfibras celulósicas.

La variable respuesta consistirá en las propiedades físicas, en la tensión nominal y deformación nominal de las cuatro mezclas.

3.8.2. Tratamiento

Se realizará un análisis de varianza de un factor para determinar si existe diferencia significativa en la media de las propiedades físicas de las cuatro mezclas en función de la proporción de microfibras de celulosa contenidas en cada película. Se completará dicho tratamiento mediante la prueba de *Fisher*.

3.8.2.1. Análisis de varianza

- Tamaño de la muestra: probetas obtenidas para cada película de almidón termoplástico con refuerzo y sin refuerzo de micro fibras de celulosa.

$$n = n_{T1} + n_{T2} \dots + n_{Tn}$$

- Media aritmética: tensión nominal y deformación nominal.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

- Suma de cuadrados de tratamientos.

$$SSA = n \sum_{i=1}^k (\bar{Y}_i - \bar{Y} \dots)^2$$

- Cuadrado medio de tratamientos.

$$S_1^2 = \frac{SSA}{(k - 1)}$$

- Cuadrado medio del error.

$$SSE = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^n (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2$$

- Suma de cuadrados totales.

$$SST = SSA + SSE$$

- Cuadrado medio del error.

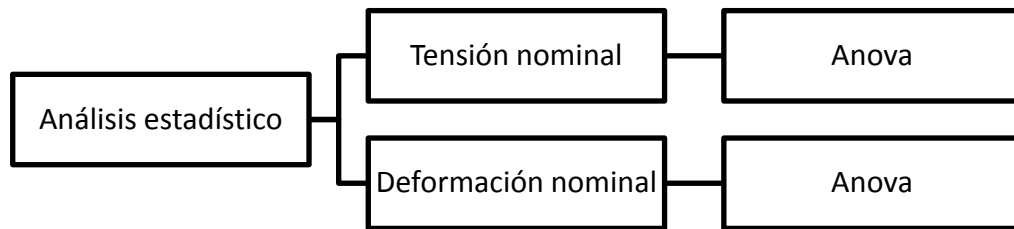
$$S^2 = \frac{SSE}{k(n - 1)}$$

- Calcular F de Fisher.

$$F = \frac{S_1^2}{S^2}$$

El análisis de varianza se realizará mediante el *software* Microsoft Excel 2016.

Figura 5. **Análisis estadístico de los datos obtenidos**



Fuente: elaboración propia.

3.8.3. Plan de análisis de los resultados

A continuación se describe el plan de análisis de los resultados.

3.8.3.1. Métodos y modelos de los datos según tipo de variables

Se tomarán los datos de la caracterización física de una película de almidón termoplástico reforzado con microfibras de celulosa. Las características físicas se tomarán para cuatro variaciones de dicha película y se determinará si existe diferencia significativa en función de las cuatro variaciones.

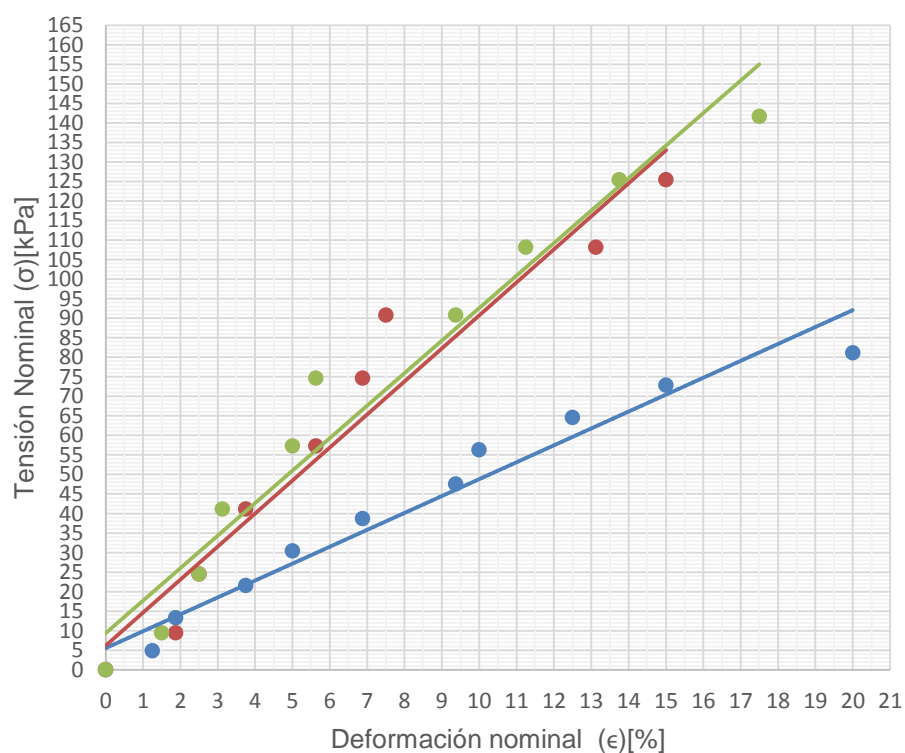
Se tomará la pérdida de masa por degradación en medio acuoso en función de las cuatro variaciones de la película anteriormente mencionada.

3.8.4. Programas a utilizar

- Microsoft Excel 2016
- Civil 3D 2017
- Microsoft Word 2016

4. RESULTADOS

Figura 6. Ensayo de tracción a tres probetas de una película de almidón termoplástico fabricada a partir de almidón nativo de yuca (*Manihot esculenta*)



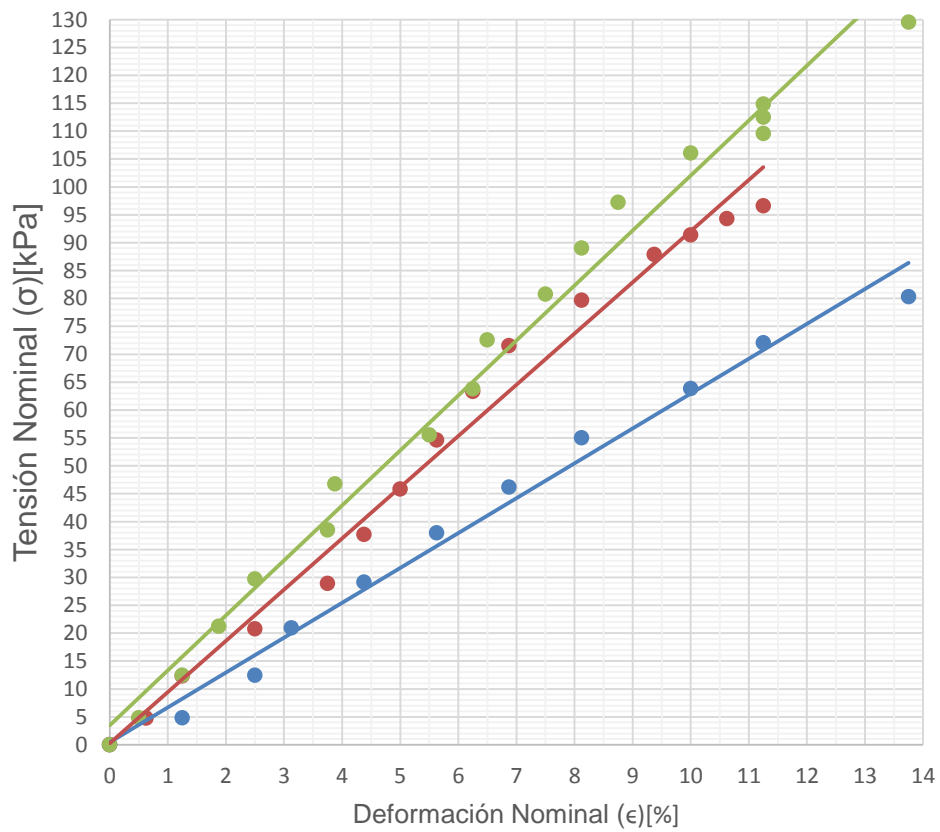
Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. Descripción de la figura 6

Color	Descripción	Modelo	R2	Rango
Blue	Probeta 1	$y = 4,3248x + 5,5306$	0,9609	0-20
Red	Probeta 2	$y = 8,4501x + 6,2405$	0,9407	0-17,5
Green	Probeta 3	$y = 8,3222x + 9,3703$	0,9582	0-15

Fuente: elaboración propia.

Figura 7. **Ensayo de tracción a tres probetas de una película de almidón termoplástico fabricada a partir de almidón nativo de yuca (*Manihot Esculenta*) con 5 % de microfibras de celulosa obtenida de la estopa del coco (*Cocos nucifera*) como refuerzo**



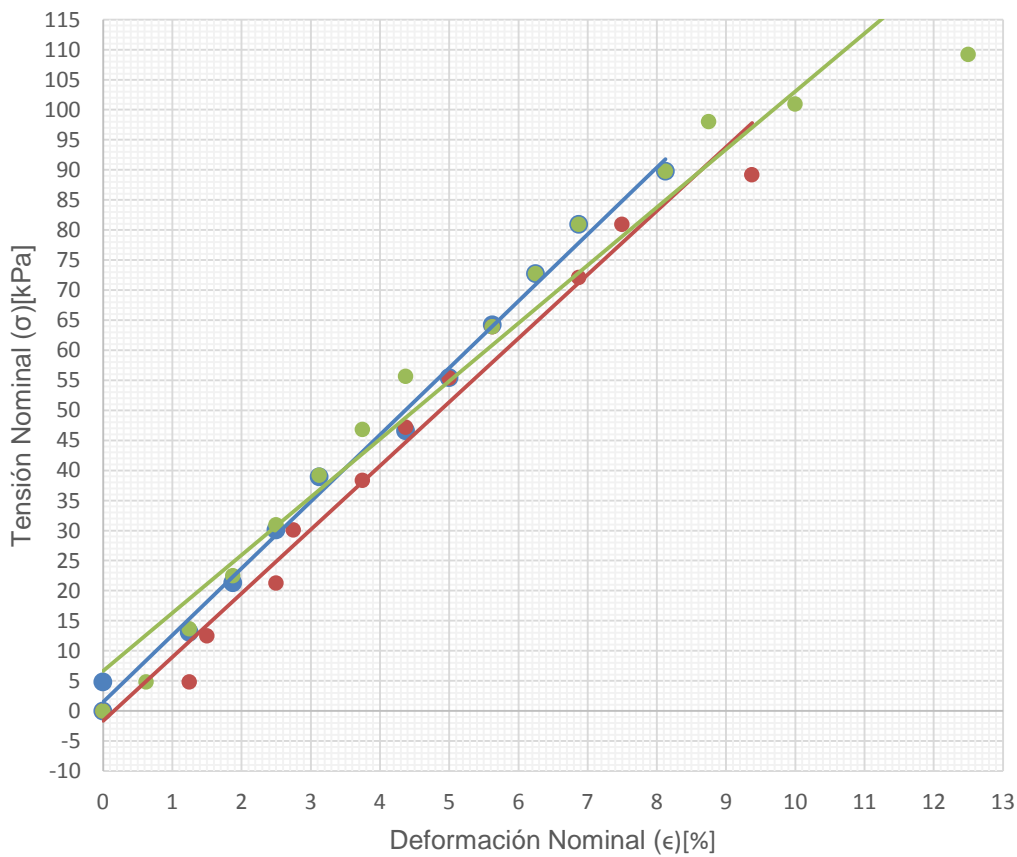
Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Descripción de la figura 7**

Color	Descripción	Modelo	R2	Rango
Blue	Probeta 1	$y = 6,2503x + 0,4496$	0,9874	0-13,75
Red	Probeta 2	$y = 91764x + 0,2788$	0,985	0-11,25
Green	Probeta 3	$y = 9,8532x + 3,5109$	0,9888	0-13,75

Fuente: elaboración propia.

Figura 8. **Ensayo de tracción a tres probetas de una película de almidón termoplástico fabricada a partir de almidón nativo de yuca (*Manihot Esculenta*) con 10 % de microfibras de celulosa obtenida de la estopa del coco (*Cocos Nucifera*) como refuerzo**



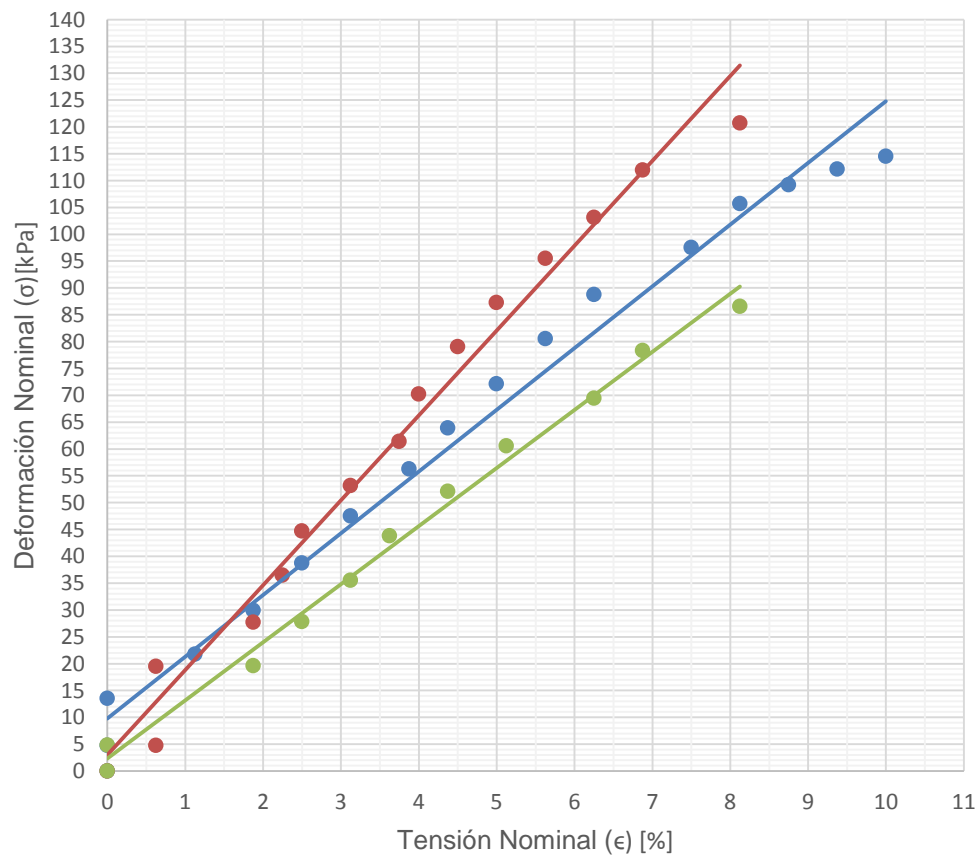
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Descripción de la figura 8**

Color	Descripción	Modelo	R2	Rango
Azul	Probeta 1	$y = 11,107x + 1,5135$	0,994	0-8,125
Rojo	Probeta 2	$y = 10,606x - 1,6497$	0,9786	0-9,375
Verde	Probeta 3	$y = 9,6383x + 6,6794$	0,9613	0-12,5

Fuente: elaboración propia.

Figura 9. **Ensayo de tracción a tres probetas de una película de almidón termoplástico fabricada a partir de almidón nativo de yuca (*Manihot Esculenta*) con 15 % de microfibras de celulosa obtenida de la estopa del coco (*Cocos Nucifera*) como refuerzo**



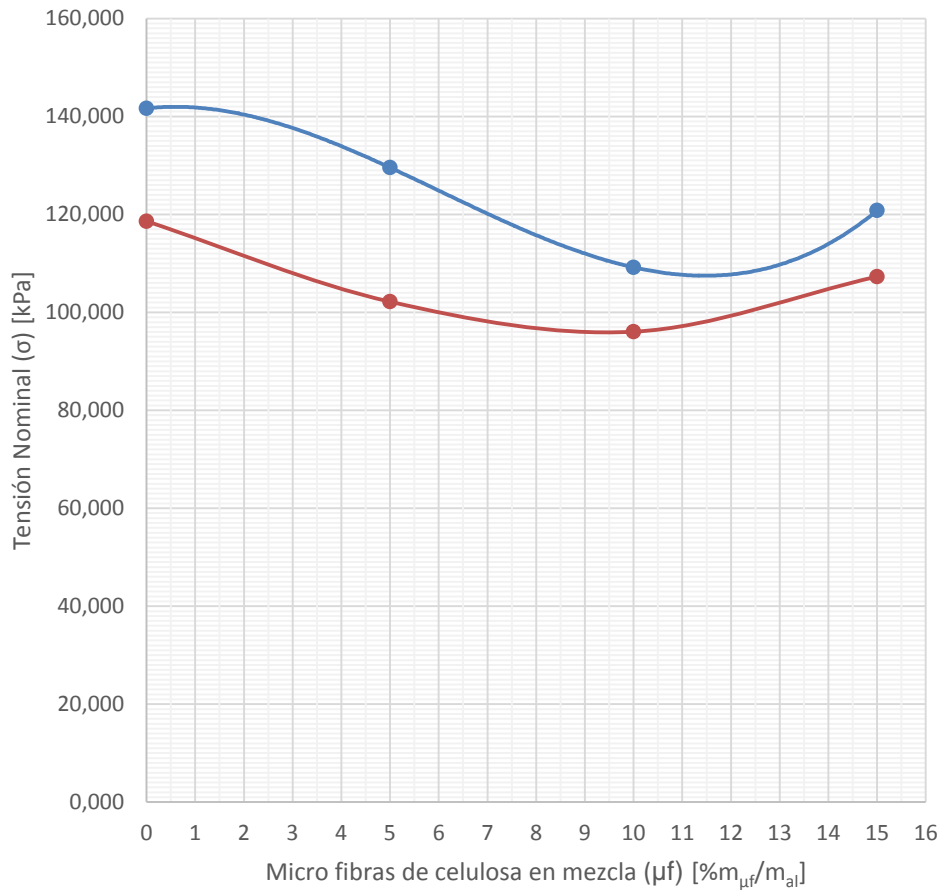
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Descripción de la figura 9**

Color	Descripción	Modelo	R2	Rango
Rojo	Probeta 1	$y = 11,496x + 9,7976$	0,9832	0-10
Azul	Probeta 2	$y = 15,812x + 2,962$	0,9833	0-8,125
Verde	Probeta 3	$y = 10,824x + 2,3316$	0,993	0-8,125

Fuente: elaboración propia.

Figura 10. **Caracterización de la tensión de rotura y tensión de rotura promedio de una película de almidón termoplástico con refuerzo de microfibras de celulosa en función de la cantidad presente de celulosa**



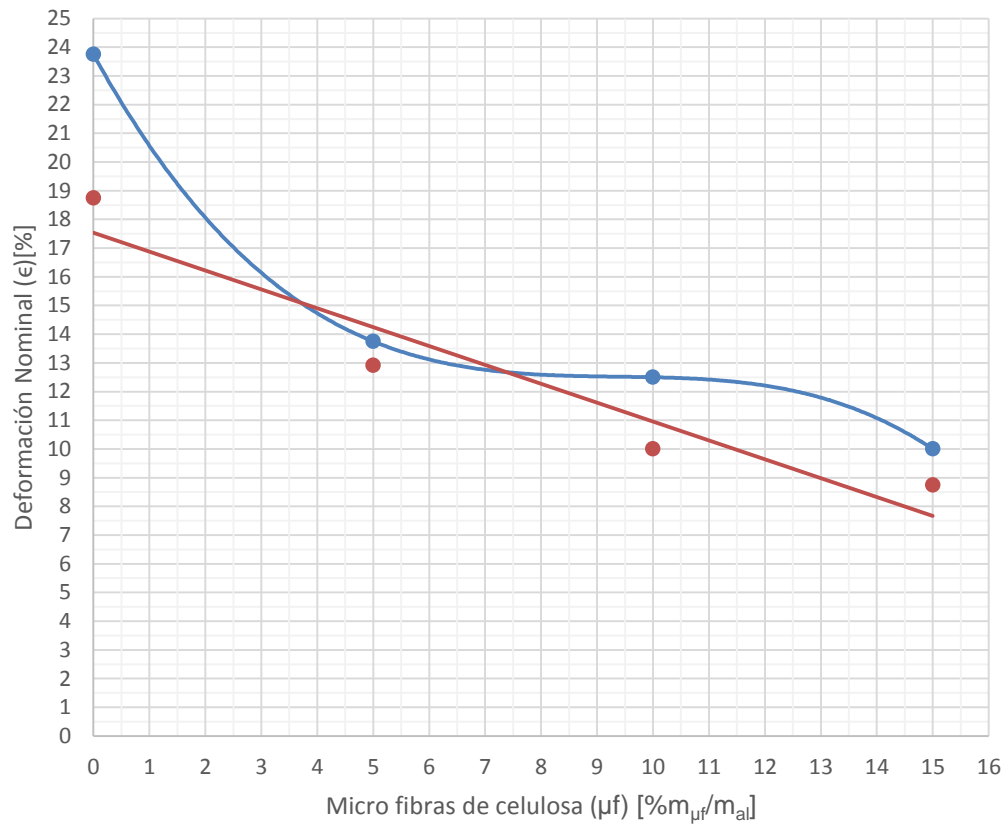
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Descripción de la figura 10**

Color	Descripción	Modelo	R2	Rango
	Tensión Nominal Máxima	$y = 0,0536x^3 - 0,9704x^2 + 1,093x + 141,65$	1	0 - 15 %
	Tensión Nominal Promedio	$y = 0,277x^2 - 4,9551x + 118,97$	0,99	0 - 15 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 11. **Caracterización de la deformación máxima por muestra y la deformación máxima promedio de películas de almidón termoplástico con refuerzo de micro fibras de celulosa en función de la cantidad presente de celulosa**



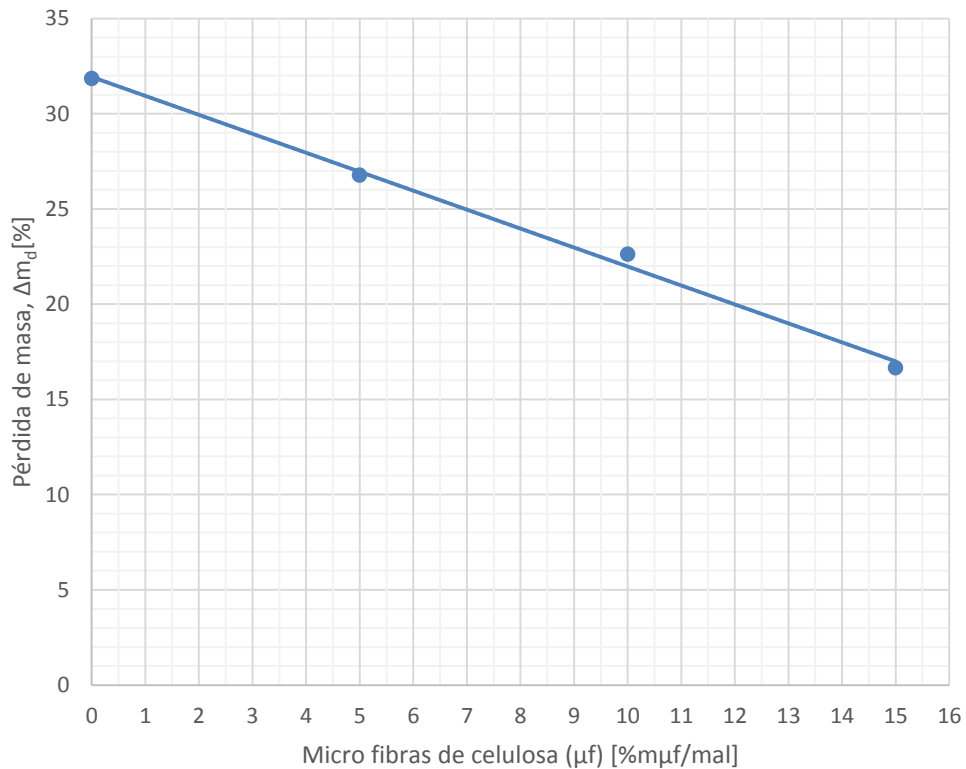
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Descripción de la figura 11**

Color	Descripción	Modelo	R2	Rango
	Deformación Nominal Máxima	$y = -0,0133x^3 + 0,375x^2 - 3,5417x + 23,75$	1	0 - 15 %
	Deformación Nominal Promedio	$y = -0,6583x + 17,542$	0,91	0 - 15 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 12. **Porcentaje de degradación de una película de almidón termoplástico y películas de almidón termoplástico reforzadas con micro fibras de celulosa en 5 %, 10 % y 15 % respecto al contenido de almidón con base seca**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. **Descripción de la figura 12**

Color	Descripción	Modelo	R2	Rango
	Degradación	$y = -0,9953x + 31,935$	0,9953	0 - 15 %

Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Se elaboró y caracterizó de forma mecánica una película de almidón termoplástico a partir de almidón nativo de yuca. Se comparó la misma con películas reforzadas con celulosa en forma de microfibras de la estopa de coco en proporciones de 5 %, 10 % y 15 % respecto a la masa de almidón nativo de yuca utilizado en la mezcla.

La película de almidón termoplástico se preparó a partir de las proporciones establecidas en el apéndice IC, utilizando agua desmineralizada y glicerina grado USP como plastificantes y ácido acético como estabilizador para neutralizar la presencia de polímeros irregulares presentes en el almidón nativo de yuca. Las proporciones fueron adaptadas mediante prueba y error para establecer el tipo de mezcla en hidrogel ideal para moldear sin que se comprometieran las cualidades mecánicas del material.

La tensión y deformación nominal se obtuvieron partiendo de los resultados del ensayo de tracción al almidón termoplástico sin refuerzo y con refuerzo de microfibras de celulosa. Se prepararon tres probetas de cada película elaborada. Se armó el sistema como se demuestra en el apéndice D, el mismo consistía en un par de mordazas, una fija a la mesa y otra móvil, sobre estas se colgó un recipiente en el cual se agregaron pesos controlados para determinar la tensión a la que se sometía la probeta. A su vez, se controló la deformación hasta que la probeta dejaba de resistir la tensión aplicada. Las Figuras 5, 6, 7 y 8 reflejan el comportamiento observado en dicho ensayo.

El diseño de las probetas se observa en el apéndice 7, las mismas obedecen a relaciones de proporcionalidad donde la elipse que definió las curvaturas al centro. Así como las curvaturas superior e inferior se realizaron a partir de una elipse que se describe con la secuencia Fibonacci. Las mismas tienen esta forma para observar con mayor claridad la falla en el centro y evitar resultados alterados por fallas de desgarro en puntos de fuerza concentrada.

La caracterización física de las probetas demostró que existió una diferencia de 0,14 mm entre el espesor de las probetas 2 y 3 y el espesor de la probeta 1, esto queda reflejado en la figura 5 donde se representa el comportamiento de la tensión nominal soportada por tres probetas de una película de almidón termoplástico en función de su deformación nominal. El modelo matemático que obedece el comportamiento de la probeta 1 tiene una pendiente menos pronunciada que la pendiente de las otras probetas. La diferencia en espesor afectó la manera en la que material respondió a la tensión, haciendo que soporte menos fuerza, pero, al mismo tiempo, una mayor elongación.

Considerando que el ajuste lineal obtuvo como resultado un coeficiente de determinación entre 0,95 y 1, se acepta el modelo como descriptivo del comportamiento de la tensión en función de la deformación. Es decir, que la probeta 1 solamente tuvo una deformación elástica y falló antes de alcanzar la zona de deformación plástica. El mismo comportamiento se observó para el resto de probetas provenientes de esta película así como las provenientes de las matrices reforzadas con microfibras de celulosa. Con dicha evidencia se afirma que el material obedeció la ley de Hook. Esta ley indica que la deformación es directamente proporcional a la magnitud de la tensión impuesta y la constante de proporcionalidad es la pendiente de los ajustes lineales que

describen el comportamiento de este fenómeno, también conocido como el módulo de elasticidad longitudinal o módulo de Young.

El módulo de elasticidad longitudinal pasa de ser 4,324 en la probeta 1 de la película 1 a ser 8,450 y 8,322 en las probetas 2 y 3 respectivamente. Este módulo puede ser interpretado como la rigidez, es decir, la resistencia a la deformación elástica (Callister, 1996). Las probetas 2 y 3, de mayor espesor, respondieron con mayor rigidez a la deformación.

Como se mencionó anteriormente, las probetas de la película 2 reforzada con 5 % en masa de microfibras de celulosa con relación al contenido de almidón nativo con base seca se comportan de forma similar a las probetas de la película 1. En este caso, la probeta 1, al igual que en la película 1, tiene un espesor menor al de las probetas 2 y 3, por lo cual su rigidez es menor. Sin embargo, existe un aumento de la rigidez de las tres probetas respecto a las de la película 1, lo cual indica que la celulosa brindó una mayor resistencia a la deformación una vez fue aplicado el refuerzo.

Las probetas de la película 3 con un refuerzo de 10 % de masa de microfibras de celulosa respecto al contenido de almidón con base seca respetan el comportamiento del material anteriormente descrito. En este caso, el espesor del largo de la película fue uniforme; tampoco existe diferencia en la ubicación de la curva descriptiva del comportamiento de la tensión que soportaron las probetas en función de la deformación. El módulo de elasticidad longitudinal se definió en 11,107; 10,606 y 9,638 para las probetas 1, 2 y 3, respectivamente, lo cual indica que existió un aumento de la rigidez del material al respecto de las matrices 1 y 2 con el aumento de microfibras de celulosa presentes en la mezcla.

La película 4 con un contenido de 15 % de microfibras de celulosa al respecto de contenido de almidón tuvo como resultado, para la probeta 1, un módulo de elasticidad de 11,496; para la probeta 2, 15,812 y para la probeta 3, 10,824. Nuevamente, existe aumento en el módulo y, por tanto, en la rigidez del material con el aumento del contenido de microfibras de celulosa.

La caracterización física de cada una de las probetas indicó que el espesor se encontró entre 1,88 mm a 2,5 mm, sin ninguna relación en particular con el contenido de celulosa de las matrices. Cada una de las matrices se moldeó de la misma forma y la diferencia entre el espesor de las probetas se atribuye a la pobre desestructuración del almidón. El almidón en su forma nativa tiene una parte amorfa formada por regiones ramificadas de amilopectina y amilosa (García, 2015) La desestructuración del almidón es necesaria para la separación de las moléculas de amilosa y amilopectina y una polimerización uniforme.

A pesar de existir esta desigualdad, como se explicó anteriormente, no hay una correlación entre el espesor y la mezcla, puesto que, el proceso de desestructuración fue igual para el almidón en todos los procedimientos. Por lo que, el aumento del módulo de elasticidad longitudinal de cada película se atribuye al único factor cambiante entre mezclas. La cantidad de microfibras de celulosa, específicamente, al aumento de las mismas en cada mezcla, por lo que existe una correlación entre la cantidad de microfibras de celulosa y la rigidez del material.

Del ensayo de tracción a cada película se obtuvo la tensión máxima y la deformación máxima por probeta que soporta cada una de las formulaciones del material. Estas fueron contrastadas con la tensión y deformación máxima promedio de las tres probetas de cada película.

En la figura 9 se contrasta el comportamiento de la tensión máxima y la tensión máxima promedio soportada en la prueba de cada material. Para la película elaborada de almidón termoplástico sin refuerzo de celulosa la probeta 3 fue la que soportó la mayor cantidad de carga, 141,65 kPa. En promedio, las tres soportaron hasta 118,614 kPa. La no uniformidad en el espesor de la película 1 pudo haber sido causante de la disparidad entre la tensión máxima soportada en la probeta 3 y la tensión máxima promedio soportada por las tres probetas.

La película 2 tuvo un comportamiento similar, siendo la probeta 3 la que mayor tensión soportó, 129,564 kPa; y una tensión máxima promedio de las tres probetas de 102,177 kPa. Nuevamente, observando una disimilitud entre la tensión máxima y la tensión máxima promedio.

La película 3 fue la película en la que menos discrepancia hubo entre la tensión máxima soportada y la tensión máxima promedio, siendo estas de 109,195 kPa y 96,052 kPa, respectivamente. Esta es la película con mayor uniformidad.

La película 4 tampoco tiene una disparidad tan grande en contraste a las matrices 1 y 2. Con una tensión máxima soportada por la probeta 2 de 120,782 kPa y una tensión máxima promedio soportada por las tres probetas de 107,310 kPa.

La tensión máxima resistida y la diferencia considerable demuestran que existe potencial para que el material ofrezca una mayor resistencia al desgarro o fallo cuando se aplica fuerza.

La tensión promedio, en función del contenido de microfibras de celulosa respecto al contenido de almidón presente en la película, pudo ser descrita mediante un modelo de grado 2. Esto indica que la tensión máxima promedio soportada por el material no tiene correlación directa con el contenido de microfibras de celulosa presentes en la película. Existe otra variable no controlada que afecta la tensión máxima que el material puede soportar. El espesor de la muestra es un factor no controlado, pero monitoreado que demostró afectar el comportamiento mecánico del material.

La inexistencia de la correlación directa entre la tensión máxima y el contenido de microfibras de celulosa se pudo comprobar mediante el análisis de varianza, el cual indicó un f de *Fisher* crítico de 4,066 y un f de *Fisher* de 0,601; siendo menor el f de *Fisher* se acepta la hipótesis nula (Walpole, 2007) y no existe diferencia significativa entre la tensión máxima soportada por cada uno de los materiales al variar el contenido de celulosa en su formulación.

Se contrastó, también, el comportamiento de la deformación máxima y la deformación máxima promedio soportada por las matrices 1, 2, 3 y 4 en función del contenido de microfibras de celulosa utilizada en su preparación.

La película 1, que no contiene un refuerzo de microfibras de celulosa, tuvo una deformación máxima de 23,75 % en la probeta 1. Es la probeta con menor espesor de la película 1 y una deformación máxima promedio de 18,75 %. En este caso, la disparidad del promedio con lo máximo soportado no fue tan significativa como en el caso de la tensión soportada.

La película 2, con un refuerzo de microfibras de celulosa de 5 % de la masa de almidón presente en la mezcla, tuvo una deformación máxima de 13,75 %. En cuanto a las probetas 2 y 3 el promedio de la deformación máxima

soportada por las tres probetas es de 12,916. Nuevamente, por la naturaleza, tanto del ensayo como del material, la discrepancia es bastante baja y levemente apreciable en la figura 10.

La deformación máxima y la deformación máxima promedio para la película 3 fue de 12,50 % en la probeta 3 y 10,00 %, respectivamente. En un análisis visual de la caracterización de la deformación, en función del contenido de microfibras de celulosa que se encuentra en la figura 10, se identifica que esta es la segunda discrepancia más grande luego de la identificada en la película 1.

Para la película 4, con un refuerzo de 15 % de microfibras de celulosa, la deformación máxima se soportó en la probeta 1 con una deformación de 10,00 % y una deformación máxima promedio de 8,75 %. En este punto se puede observar convergencia de la curva que describe el comportamiento de la deformación máxima con la que describe el comportamiento de la deformación máxima promedio en función del contenido de microfibras de celulosa.

En comparación, las deformaciones máximas del material al ser sometido a una tensión con la deformación máxima promedio no tienen una diferencia significativa. La elasticidad del material demostró ser semejante para cada película durante las tres partes del ensayo.

La curva representada en la figura 10 que describe la deformación máxima obedece a un modelo de grado 3, lo cual indica que no existe dependencia directa de la deformación máxima de una de las muestras en función del contenido de microfibras de celulosa. Sin embargo, al observar la curva que describe el comportamiento de la deformación máxima promedio en función del

contenido de microfibras de celulosa existe una clara correlación entre una variable y otra.

Al adaptar un modelo lineal a los datos mencionados se obtiene un coeficiente de determinación de 0,9104. Lo cual, es un coeficiente de determinación bastante alto e indica la posibilidad de una dependencia de la deformación máxima soportada por el material al contenido de microfibras de celulosa presente en dicho material.

El modelo lineal adaptado a la curva posee una pendiente negativa. La dependencia de una variable sobre la otra es inversamente proporcional, es decir, a medida que existe un aumento de microfibras de celulosa en la película, disminuye su deformación, o sea, su elasticidad.

Un análisis de varianza demuestra que, en efecto, existe diferencia significativa en la deformación máxima del material al ser sometido a una fuerza cuando se aumenta la cantidad de microfibras de celulosa en la película. Dando como resultado un *f* de *Fisher* de 8,309 y un *f* de *Fisher* crítico de 4,066. Se rechaza la hipótesis nula.

Se demuestra, entonces, que un refuerzo con microfibras de celulosa en una película de almidón termoplástico brinda una mayor rigidez al almidón termoplástico. Aun cuando no exista un efecto significativo a su resistencia a la tensión soportada.

Se realizó una prueba de degradación del material en medio acuoso mediante la determinación del porcentaje de pérdida de masa de tres muestras provenientes de cada una de las matrices 1, 2, 3 y 4. La prueba se realizó sin refuerzo y con refuerzo de microfibras de celulosa de acuerdo a las

proporciones establecidas. Las muestras fueron sumergidas en agua corriente durante 72 horas, luego fueron extraídas y secadas al ambiente para evitar alteraciones en sus características físicas y mecánicas por gradientes de temperatura.

En la Figura 11 se ubican los resultados de la prueba de degradación en medio acuoso del material, específicamente, el porcentaje de pérdida de masa de la muestra de cada película en función del contenido de microfibras de celulosa presentes en la misma.

Se cuadró un modelo lineal a los resultados de la relación del porcentaje de degradación con el contenido de celulosa presente en la muestra. Se obtuvo un coeficiente de determinación de 0,995. Se aprecia que existe una disminución en la degradación del material a medida que se aumenta la presencia de microfibra de celulosa.

El análisis de varianza, sin embargo, demostró, con un *f* de *Fisher* de 1,041 y un valor crítico mayor en 4,066, que no existe diferencia significativa entre la degradación del material a medida que se aumenta su contenido de microfibras de celulosa. Se acepta la hipótesis nula como se estableció anteriormente. La celulosa tiene una estructura lineal o fibrosa en la que se establecen múltiples puentes de hidrógeno entre los grupos hidroxilo de distintas cadenas yuxtapuestas de glucosa. Esto las hace muy resistentes e insolubles al agua. Al agregar la microfibra de celulosa a la película de almidón termoplástico se pretendió utilizar dicha propiedad para retardar el tiempo de degradación del material en medio acuoso, lo cual, de acuerdo a relación de dependencia inversamente proporcional de la degradación del material en función del contenido de microfibras de celulosa, se alcanzó.

La discrepancia entre ambos resultados existió debido a la variación considerable entre los datos de cada muestra. Si bien, para cada una de las muestras de cada película se disminuyó la degradación. Los mismos, eran demasiado variantes entre muestras de una misma película, por lo que no se puede evidenciar mediante un análisis de varianza la dependencia de la degradación del material al contenido de microfibras de celulosa contenidas. La pérdida de masa se vio influenciada no solo por la degradación en medio acuoso, sino por variables no controladas, desde el secado al ambiente hasta la posibilidad de la biodegradación del mismo.

Como se muestra en el apéndice 8, las muestras tuvieron crecimiento de microorganismos estos pudieron afectar su degradación, por lo cual, no es posible establecer una relación directa entre la degradación del material y la cantidad de celulosa.

La celulosa, en este caso las microfibras de celulosa, demostró un potencial importante como material alternativo a utilizar en la mejora del almidón termoplástico. Tanto en su aumento del módulo de elasticidad longitudinal, en la resistencia a la deformación y la retardación de la degradación en medio acuoso. Además de ser un material sintetizable este se encuentra de forma extensiva en la naturaleza y puede ser obtenido a partir de fuentes que, de otro modo, se descartarían como la estopa de coco.

CONCLUSIONES

1. Existió una relación directa de proporcionalidad entre la tensión nominal y la deformación nominal para las películas de almidón termoplástico provenientes de las mezclas con 0 %, 5 %, 10 %, y 15 % en masa de celulosa con respecto a la masa de almidón con base seca. El módulo de elasticidad longitudinal aumentó para cada película a medida que aumentó la cantidad de celulosa en la misma. El material tuvo una deformación completamente elástica.
2. Existió discrepancia considerable entre la tensión de rotura máxima soportada y la tensión de rotura promedio soportada por las probetas de cada una de las películas de almidón termoplástico, ya sea con refuerzo o sin refuerzo de microfibras de celulosa en proporciones 0 %, 5 %, 10 % y 15 % con respecto a la masa de almidón con base seca.
3. No existió disparidad considerable en la deformación máxima y la deformación máxima promedio de las probetas. Para ninguna de las películas observadas la deformación máxima se comportó de forma inversamente proporcional a la cantidad de celulosa contenida en la mezcla.
4. No existió diferencia significativa en la tensión de rotura soportada por las películas de almidón termoplástico elaborado a partir de almidón nativo de yuca. A medida que se cambió la proporción de un refuerzo con microfibras de celulosa en proporciones de 0 %, 5 %, 10 %, y 15 % en masa con respecto a la masa del almidón con base seca.

5. Se determinó que sí existió diferencia significativa en la deformación máxima soportada por las películas de almidón termoplástico sin refuerzo y con un refuerzo de 10 % y 15 % de microfibras de celulosa. No existió diferencia significativa en la deformación máxima soportada entre la película de almidón termoplástico sin refuerzo y con un refuerzo de 5 % de microfibras de celulosa.

6. Se calculó que el porcentaje de degradación en un medio acuoso del material disminuyó a medida que aumentó la presencia de microfibras de celulosa en la película. La presencia de celulosa en las películas de almidón termoplástico retardó la degradación de las mismas en medio acuoso.

RECOMENDACIONES

1. Disminuir la cantidad de agua y aumentar la cantidad de glicerina y otros plastificantes en la preparación del material para asegurar la desestructuración de las moléculas de amilosa y amilopectina. Asegurar un reacomodo uniforme.
2. Trabajar la preparación del material a presión y alta temperatura. No con la técnica de moldeado para disminuir o eliminar las burbujas de aire que se obtienen durante la mezcla del hidrogel.
3. Incluir aditivos anti bacterianos y fungicidas biodegradables para acondicionar el material con el fin de utilizarlo en la industria alimenticia.
4. Utilizar el material reforzado como empaque temporal. Por ejemplo, para objetos de un solo uso y descartables que deban tener rigidez y contacto con líquidos durante poco tiempo como pajillas, cubiertos desechables, entre otros.

BIBLIOGRAFÍA

1. ALARCÓN CAVERO, Hugo, ARROYO BENITES, Edmundo. *Evaluación de las propiedades químicas y mecánicas de biopolímeros a partir del almidón modificado de la papa*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería, 2016. 181 p.
2. CUEVAS CARBALLO, Zujey Berenice, *Obtención y caracterización de almidones termoplásticos obtenidos a partir de almidones injertados con poliésteres biodegradables*. Yucatán, México: Centro de Investigación Científica de Yucatán, 2017. 135 p.
3. GÁLVEZ ARÉVALO, Ana Gabriela. *Elaboración de plástico biodegradable a partir del almidón extraído del maíz (Zea mays)*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2016. 114 p.
4. GARCÍA QUIÑONEZ, Alma Verónica, *Obtención de un polímero biodegradable a partir de almidón de maíz*. [en línea]. <<https://www.itca.edu.sv/wp-content/themes/elaniin-itca/docs/2015-Obtencion-de-un-polimero-biodegradable.pdf>>. [Consulta: 20 de mayo de 2019].
5. MENESES, Juliana, CORRALES, Catalina, VALENCIA Marco. *Síntesis y caracterización de un polímero biodegradable a partir del almidón de yuca*. [en línea]. <<http://www.scielo.org.co/scielo.php?>

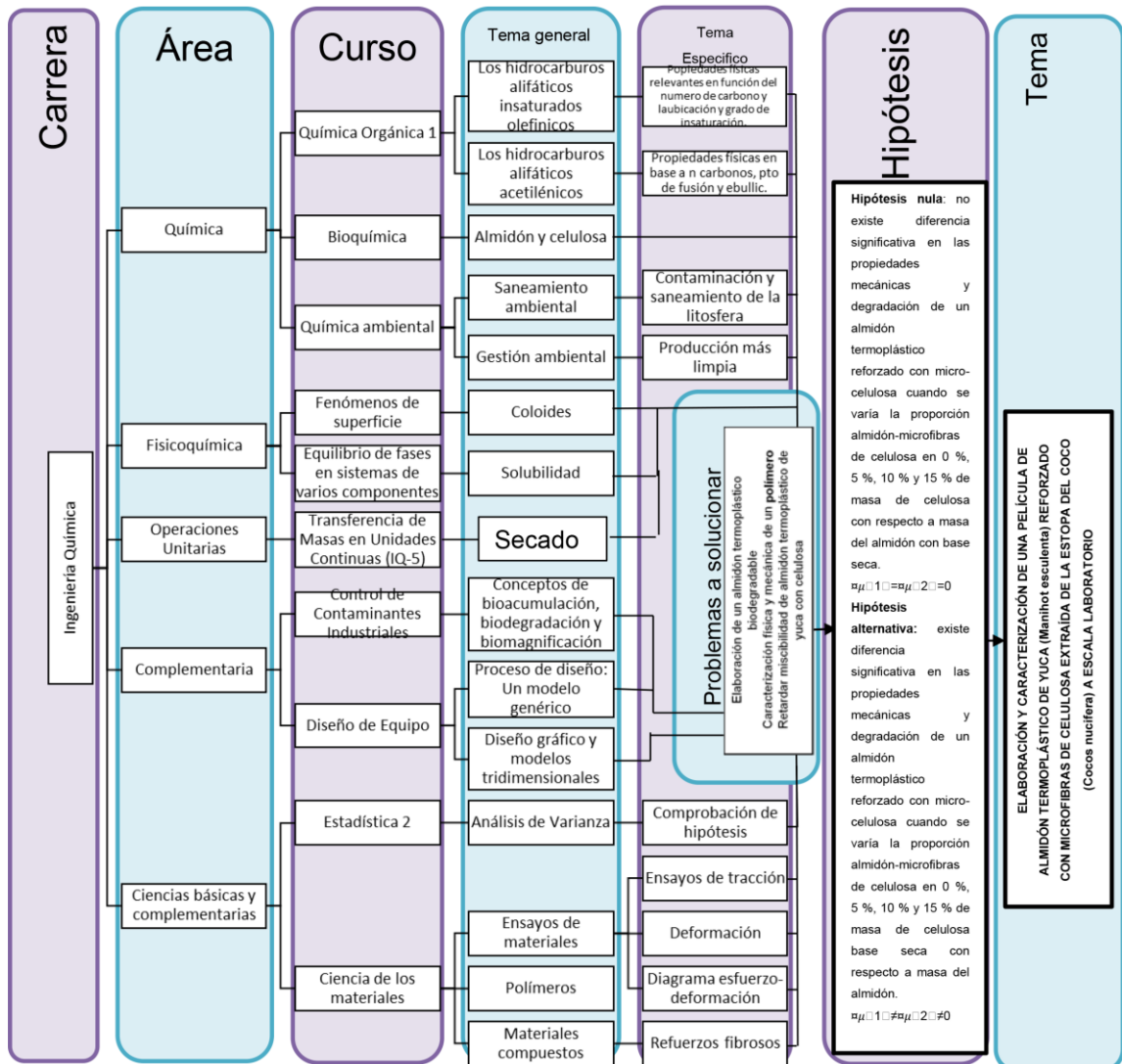
script=sci_arttext&pid=S1794-12372007000200006>. [Consulta: 20 de mayo de 2019].

6. MERÉ MARCOS, Javier. *Estudio del procesado de un polímero termoplástico basado en almidón de patata amigable con el medio ambiente*. Madrid, España: Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales de Ingeniería Química de la Universidad Carlos III de Madrid, 2009. 218 p.
7. MOLLINEDO PAIZ, Edgar Leonel. *Elaboración de plástico biodegradable a partir de almidón de maíz evaluando su degradabilidad con ácido sulfúrico y su expansión polimérica al variar la formulación*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2017. 109 p.
8. ORTEGA-TORO, Rodrigo. *Films de Almidón Termoplástico Influencia de la incorporación de hidroxipropil-metil-celulosa y ácido cítrico*. [en línea]. <http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1692-35612014000200015&script=sci_abstract&tlng=es>. [Consulta: 20 de mayo de 2019].
9. REYNA CORADO, Helena Alejandra, *Comparación de dos biopolímeros, uno a base de almidón de papa y otro a base de almidón de papa y goma xantan*. [en línea]. <http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/06/06_4214.pdf>. [Consulta: 20 de mayo de 2019].

10. RUIZ AVILÉS, Gladys. *Obtención y caracterización de un polímero biodegradable a partir del almidón de yuca*. [en línea]. <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=83520401>>. [Consulta: 20 de mayo de 2019].
11. SEYMOUR, R., CARRAHER, C. *Introducción a la química de los polímeros*. Barcelona, España: Reverté, 2002. 736 p.
12. TEIXEIRA, E., PASQUINI, D., CURVELO, A., CORRADINI, E. BELGACEM, M., DUFRESNE, A. *Cassava bagasse cellulose nanofibrils reinforced thermoplastic cassava starch*. [en línea] <https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/39949373/Cassava_bagasse_cellulose_nanofibrils_re20151112-9195-o0i_2wx.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1558338700&Signature=jbsE1WG4DoV23qULxY8t5JpCeh0%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DCassava_bagasse_cellulose_nanofibrils_re.pdf>. [Consulta: 20 de mayo de 2019].
13. VILLADA, Hector. *Investigación de Almidones Termoplásticos, Precursores de Productos Biodegradables*. [en línea] <https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0718-07642008000200002&lng=es&nrm=iso>. [Consulta: 20 de mayo de 2019].
14. WALPOLE, Ronald, MYERS, Raymond, MYERS, Sharon, YE, Keying. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. 8a ed. México: Pearson Education, 2007. 816 p.

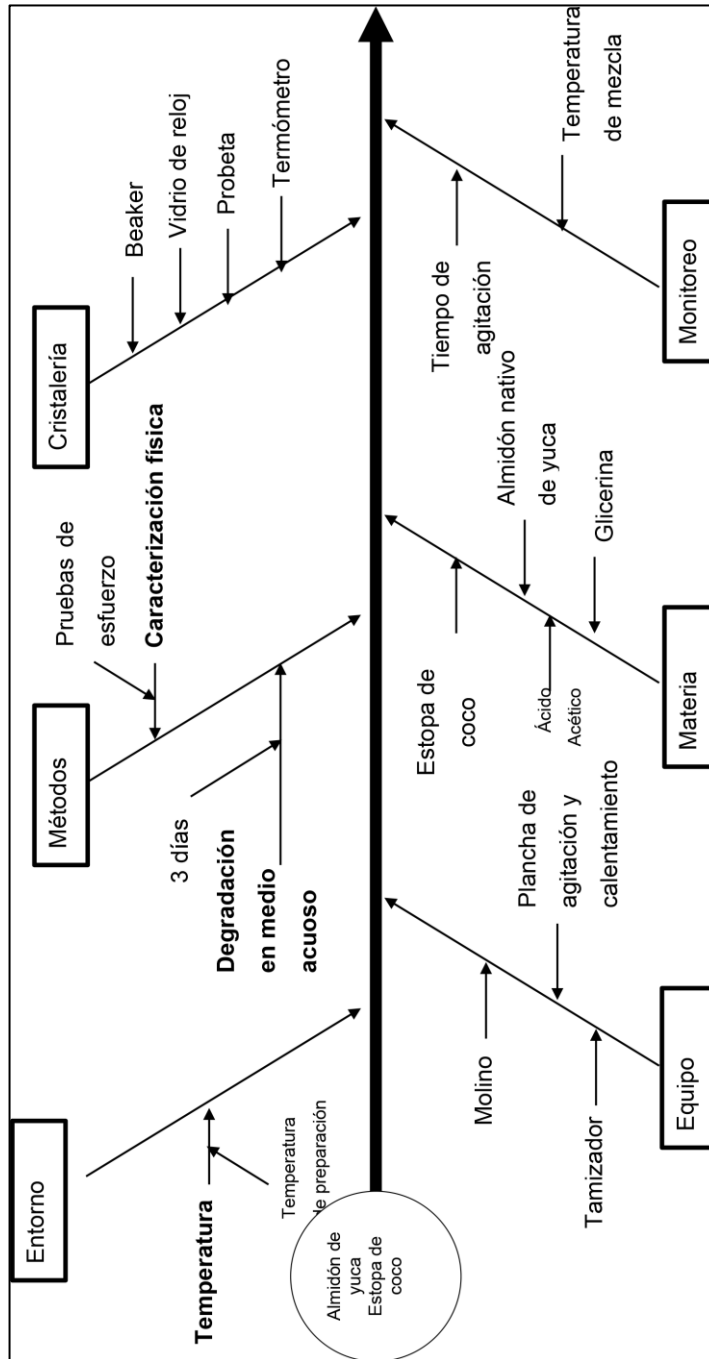
APÉNDICES

Apéndice 1. Requisitos académicos



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Árbol de problemas**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Metodología de cálculo

- Determinación de la tensión nominal

El cálculo de la fuerza aplicada a una probeta obtenida de una película de almidón termoplástico a partir de los datos obtenidos de un ensayo de tracción:

$$F = m_T * G$$

Para la probeta 1 de la película de almidón formada a partir de la mezcla 1:

$$F = m_T * G = 83,018g * 9,806 m/s^2$$
$$F = 814,076 N$$

Se realizó el mismo tratamiento para los datos obtenidos del ensayo de tracción del resto de probetas provenientes de esta película de almidón termoplástico. También para las provenientes de las mezclas 2, 3 y 4.

Cálculo del área superficial de una probeta obtenida de una película de almidón termoplástico.

$$A_0 = 2A_c + L * E$$

Para la probeta 1 de la película de almidón formada a partir de la mezcla 1 y a partir de las dimensiones especificadas en el apéndice.

$$A_0 = 2A_s + L * E$$
$$A_s = 2(4,51 * 10^{-3} m^2) + (8,54 * 10^{-2} m)(1,88 * 10^{-2} m)$$
$$A_0 = 1,062 * 10^{-2} m^2$$

Continuación del apéndice 3.

Se realizó el mismo tratamiento para los datos obtenidos del ensayo de tracción del resto de probetas provenientes de esta película de almidón termoplástico. También para las provenientes de las mezclas 2, 3 y 4.

Determinación de la tensión nominal en el ensayo de tracción a las probetas de almidón termoplástico de las mezclas 1, 2, 3 y 4.

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

Para la probeta 1 de la película de almidón formada a partir de la mezcla 1 la tensión nominal máxima.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} = \frac{814,076 \text{ N}}{1,062 * 10^{-2} \text{ m}^2} = 76642,840 \text{ Pa}$$

Conversión de la deformación nominal en pascales a kilo pascales.

$$76642,84088 \text{ Pa} * \frac{1 \text{ kPa}}{1000 \text{ Pa}} = 76,642 \text{ kPa}$$

Se realizó el mismo tratamiento para los datos obtenidos del ensayo de tracción del resto de probetas provenientes de esta película de almidón termoplástico, así como para las provenientes de las mezclas 2, 3 y 4.

Continuación del apéndice 3.

- Determinación de la deformación nominal

Determinación de la deformación nominal en el ensayo de tracción a las probetas de almidón termoplástico de las mezclas 1, 2, 3 y 4.

$$\epsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} * 100$$

Para la probeta 1 de la película de almidón formada a partir de la mezcla 1 la deformación nominal máxima.

$$\epsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} * 100 = \frac{99 - 80}{80} * 100 = 23,75 \%$$

Se realizó el mismo tratamiento para los datos obtenidos del ensayo de tracción del resto de probetas provenientes de esta película de almidón termoplástico, así como para las provenientes de las mezclas 2, 3 y 4.

- Determinación de la pérdida de masa por degradación

Cálculo de la pérdida de masa por degradación en medio acuoso de una película de almidón termoplástico y películas de almidón termoplástico reforzado con micro fibras de celulosa.

$$\Delta m_d = \frac{m_0 - m_f}{m_0} * 100$$

Continuación del apéndice 3.

Para la muestra 1 realizada con almidón termoplástico proveniente de la mezcla 1.

$$\Delta m_d = \frac{m_0 - m_f}{m_0} * 100 = \frac{15,0g - 9,0g}{15,0g} * 100 = 40,00 \%$$

Se realizó el mismo tratamiento para los datos obtenidos de la prueba de degradación en medio acuoso del resto de muestras provenientes de esta película de almidón termoplástico, así como para las provenientes de las mezclas 2, 3 y 4.

- Test de Tukey para la identificación de diferencia significativa entre medias para la deformación elástica del material.

Con 8 grados de libertad y un nivel de confianza del 95 %.

$$P_\alpha = 4,53$$
$$MSe = \frac{SS}{\text{Grados de libertad}} = \frac{57,29}{8} = 7,1614$$

La diferencia honestamente significativa:

$$HSD = P_\alpha \sqrt{\frac{MSe}{n}} = 4,53 \sqrt{\frac{7,1614}{3}} = 6,99$$

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. Datos calculados

- Ensayo de tracción de la película 1 de almidón termoplástico elaborada a partir de la mezcla 1, probeta 1

n	Masa aplicada [kg]	Fuerza aplicada [N]	Tensión nominal, σ [kPa]	Elongación [m]	Deformación nominal, ϵ [%]
1	0	0	0.000	8.00E-02	0.00
2	4,520	44,343	4,832	8,10E-02	1,250
3	12,458	122,215	13,319	8,15E-02	1,875
4	20,175	197,924	21,569	8,30E-02	3,750
5	28,444	279,040	30,409	8,40E-02	5,000
6	36,162	354,749	38,659	8,55E-02	6,875
7	44,430	435,865	47,499	8,75E-02	9,375
8	52,699	516,982	56,339	8,80E-02	10,000
9	60,417	592,690	64,589	9,00E-02	12,500
10	68,134	668,399	72,839	9,20E-02	15,000
11	75,852	744,108	81,090	9,60E-02	20,000
12 (Fallo)	83,018	814,076	88,715	9,90E-02	23,750

- Ensayo de tracción de la película 1 de almidón termoplástico elaborada a partir de la mezcla 1, probeta 2

N	Masa aplicada [kg]	Fuerza aplicada [N]	Tensión Nominal, σ [kPa]	Elongación [m]	Deformación Nominal, ϵ [%]
1	0	0	0,000	8,00E-02	0
2	4,520	44,325	9,474	8,15E-02	1,875
3	11,686	114,597	24,494	8,20E-02	2,500
4	19,624	192,437	41,132	8,30E-02	3,750
5	27,342	268,115	57,308	8,45E-02	5,625
6	35,610	349,199	74,639	8,55E-02	6,875
7	43,328	424,876	90,814	8,60E-02	7,500
8	51,59	505,960	108,145	9,05E-02	13,125
9 (Fallo)	59,865	587,043	125,476	9,20E-02	15,000

Continuación del apéndice 4.

- Ensayo de tracción de la película 1 de almidón termoplástico elaborada a partir de la mezcla 1, probeta 3

n	Masa aplicada [kg]	Fuerza aplicada [N]	Tensión Nominal, σ [kPa]	Elongación [m]	Deformación Nominal, ϵ [%]
1	0	0	0,000	8,00E-02	0,000
2	4,520	44,325	9,474	8,12E-02	1,500
3	11,686	114,597	24,494	8,20E-02	2,500
4	19,624	192,437	41,132	8,25E-02	3,125
5	27,342	268,115	57,308	8,40E-02	5,000
6	35,610	349,199	74,639	8,45E-02	5,625
7	43,328	424,876	90,814	8,75E-02	9,375
8	51,597	505,960	108,145	8,90E-02	11,250
9	59,865	587,043	125,476	9,10E-02	13,750
10 (Fallo)	67,583	662,721	141,652	9,40E-02	17,500

- Ensayo de tracción de la película 2 de almidón termoplástico elaborada a partir de la mezcla 2 con 5 % en masa de microfibras de celulosa respecto a la cantidad de almidón con base seca, probeta 1

n	Masa aplicada [kg]	Fuerza aplicada [N]	Tensión Nominal, σ [kPa]	Elongación [m]	Deformación Nominal, ϵ [%]
1	0,000	0,000	0,000	8,00E-02	0,000
2	4,518	44,305	4,822	8,10E-02	1,250
3	11,681	114,546	12,467	8,20E-02	2,500
4	19,616	192,351	20,935	8,25E-02	3,125
5	27,330	267,994	29,168	8,35E-02	4,375
6	35,595	349,041	37,989	8,45E-02	5,625
7	43,309	424,684	46,222	8,55E-02	6,875
8	51,574	505,731	55,043	8,65E-02	8,125
9	59,839	586,777	63,864	8,80E-02	10,000
10	67,553	662,421	72,097	8,90E-02	11,250
11 (Fallo)	75,267	738,064	80,329	9,10E-02	13,750

Continuación del apéndice 4.

- Ensayo de tracción de la película 2 de almidón termoplástico elaborada a partir de la mezcla 2 con 5 % en masa de microfibras de celulosa respecto a la cantidad de almidón con base seca, probeta 2

n	Masa aplicada [kg]	Fuerza aplicada [N]	Tensión Nominal, σ [kPa]	Elongación [m]	Deformación Nominal, ϵ [%]
1	0,000	0,000	0,000	8,00E-02	0,000
2	4,518	44,305	4,785	8,05E-02	0,625
3	11,681	114,546	12,372	8,10E-02	1,250
4	19,616	192,351	20,775	8,20E-02	2,500
5	27,330	267,994	28,945	8,30E-02	3,750
6	35,595	349,041	37,698	8,35E-02	4,375
7	43,309	424,684	45,868	8,40E-02	5,000
8	51,574	505,731	54,621	8,45E-02	5,625
9	59,839	586,777	63,375	8,50E-02	6,250
10	67,553	662,421	71,545	8,55E-02	6,875
11	75,267	738,064	79,715	8,65E-02	8,125
12	82,981	813,708	87,884	8,75E-02	9,375
13	86,287	846,126	91,386	8,80E-02	10,000
14	89,042	873,142	94,304	8,85E-02	10,625
15 (Fallo)	91,246	894,754	96,638	8,90E-02	11,250

- Ensayo de tracción de la película 2 de almidón termoplástico elaborada a partir de la mezcla 2 con 5 % en masa de microfibras de celulosa respecto a la cantidad de almidón con base seca, probeta 3

N	Masa aplicada [kg]	Fuerza aplicada [N]	Tensión Nominal, σ [kPa]	Elongación [m]	Deformación Nominal, ϵ [%]
1	0,000	0,000	0,000	8,00E-02	0,000
2	4,518	44,305	4,816	8,04E-02	0,500
3	11,681	114,546	12,451	8,10E-02	1,250
4	19,946	195,592	21,261	8,15E-02	1,875
5	27,881	273,397	29,719	8,20E-02	2,500
6	36,146	354,444	38,529	8,30E-02	3,750
7	43,860	430,087	46,751	8,31E-02	3,875
8	52,125	511,134	55,561	8,44E-02	5,500

Continuación del apéndice 4.

9	59,839	586,777	63,784	8,50E-02	6,250
10	68,104	667,824	72,594	8,52E-02	6,500
11	75,818	743,467	80,816	8,60E-02	7,500
12	83,532	819,111	89,039	8,65E-02	8,125
13	91,246	894,754	97,261	8,70E-02	8,750
14	99,511	975,801	106,071	8,80E-02	10,000
15	102,817	1008,220	109,595	8,90E-02	11,250
16	105,572	1035,235	112,532	8,90E-02	11,250
17	107,776	1056,848	114,881	8,90E-02	11,250
18 (Fallo)	121,551	1191,925	129,564	9,10E-02	13,750

- Ensayo de tracción de la película 3 de almidón termoplástico elaborada a partir de la mezcla 3 con 10 % en masa de microfibras de celulosa respecto a la cantidad de almidón con base seca, probeta 1

N	Masa aplicada [kg]	Fuerza aplicada [N]	Tensión Nominal, σ [kPa]	Elongación [m]	Deformación Nominal, ϵ [%]
1	0	0	0.000	8.00E-02	0.000
2	4.518	44.305	4.824	8.00E-02	0.000
3	12.232	119.948	13.061	8.10E-02	1.250
4	19.946	195.592	21.298	8.15E-02	1.875
5	28.211	276.639	30.123	8.20E-02	2.500
6	36.476	357.685	38.948	8.25E-02	3.125
7	43.639	427.925	46.596	8.35E-02	4.375
8	51.904	508.972	55.421	8.40E-02	5.000
9	60.169	590.019	64.246	8.45E-02	5.625
10	68.103	667.823	72.718	8.50E-02	6.250
11	75.817	743.467	80.955	8.55E-02	6.875
12(Fallo)	84.082	824.513	89.780	8.65E-02	8.125

Continuación del apéndice 4.

- Ensayo de tracción de la película 3 de almidón termoplástico elaborada a partir de la mezcla 3 con 10 % en masa de microfibras de celulosa respecto a la cantidad de almidón con base seca, probeta 2

N	Masa aplicada [kg]	Fuerza aplicada [N]	Tensión Nominal, σ [kPa]	Elongación [m]	Deformación Nominal, ϵ [%]
1	0,000	0,000	0,000	8,00E-02	0,000
2	4,518	44,305	4,824	8,10E-02	1,250
3	11,681	114,546	12,471	8,12E-02	1,500
4	19,946	195,592	21,295	8,20E-02	2,500
5	28,211	276,639	30,119	8,22E-02	2,750
6	35,925	352,283	38,354	8,30E-02	3,750
7	44,190	433,329	47,178	8,35E-02	4,375
8	51,904	508,973	55,414	8,40E-02	5,000
9	59,839	586,777	63,884	8,45E-02	5,625
10	67,553	662,421	72,120	8,55E-02	6,875
11	75,818	743,467	80,944	8,60E-02	7,500
12 (Fallo)	83,532	819,111	89,179	8,75E-02	9,375

- Ensayo de tracción de la película 3 de almidón termoplástico elaborada a partir de la mezcla 3 con 10 % en masa de microfibras de celulosa respecto a la cantidad de almidón con base seca, probeta 3

N	Masa aplicada [kg]	Fuerza aplicada [N]	Tensión Nominal, σ [kPa]	Elongación [m]	Deformación Nominal, ϵ [%]
1	0,000	0,000	0,000	8,00E-02	0,000
2	4,518	44,305	4,824	8,05E-02	0,625
3	12,783	125,352	13,649	8,10E-02	1,250
4	21,048	206,399	22,474	8,15E-02	1,875
5	28,983	284,203	30,947	8,20E-02	2,500
6	36,697	359,847	39,183	8,25E-02	3,125
7	43,860	430,087	46,832	8,30E-02	3,750
8	52,125	511,134	55,657	8,35E-02	4,375
9	59,839	586,777	63,893	8,45E-02	5,625
10	68,104	667,824	72,718	8,50E-02	6,250

Continuación del apéndice 4.

11	75,818	743,467	80,955	8,55E-02	6,875
12	84,083	824,514	89,780	8,65E-02	8,125
13	91,797	900,157	98,017	8,70E-02	8,750
14	94,552	927,173	100,959	8,80E-02	10,000
15 (fallo)	102,266	1 002,816	109,195	9,00E-02	12,500

- Ensayo de tracción de la película 4 de almidón termoplástico elaborada a partir de la mezcla 4 con 15 % en masa de microfibras de celulosa respecto a la cantidad de almidón con base seca, probeta 1

N	Masa aplicada [kg]	Fuerza aplicada [N]	Tensión Nominal, σ [kPa]	Elongación [m]	Deformación Nominal, ϵ [%]
1	0,000	0,000	0,000	8,00E-02	0,000
2	4,518	44,305	4,802	8,00E-02	0,000
3	12,783	125,352	13,585	8,00E-02	0,000
4	20,497	200,996	21,783	8,09E-02	1,125
5	28,211	276,639	29,981	8,15E-02	1,875
6	36,476	357,686	38,764	8,20E-02	2,500
7	44,741	438,732	47,547	8,25E-02	3,125
8	53,006	519,779	56,331	8,31E-02	3,875
9	60,169	590,019	63,943	8,35E-02	4,375
10	67,883	665,663	72,141	8,40E-02	5,000
11	75,818	743,467	80,573	8,45E-02	5,625
12	83,532	819,111	88,771	8,50E-02	6,250
13	91,797	900,157	97,554	8,60E-02	7,500
14	99,511	975,801	105,752	8,65E-02	8,125
15	102,817	1 008,220	109,266	8,70E-02	8,750
16	105,572	1 035,235	112,193	8,75E-02	9,375
17 (fallo)	107,776	1 056,848	114,536	8,80E-02	10,000

Continuación del apéndice 4.

- Ensayo de tracción de la película 4 de almidón termoplástico elaborada a partir de la mezcla 4 con 15 % en masa de microfibras de celulosa respecto a la cantidad de almidón con base seca, probeta 2

N	Masa aplicada [kg]	Fuerza aplicada [N]	Tensión Nominal, σ [kPa]	Elongación [m]	Deformación Nominal, ϵ [%]
1	0,000	0,000	0,000	8,00E-02	0,000
2	4,518	44,305	4,817	8,05E-02	0,625
3	18,293	179,383	19,504	8,05E-02	0,625
4	26,007	255,027	27,728	8,15E-02	1,875
5	34,272	336,073	36,540	8,18E-02	2,250
6	41,986	411,717	44,765	8,20E-02	2,500
7	49,921	489,521	53,224	8,25E-02	3,125
8	57,635	565,165	61,449	8,30E-02	3,750
9	65,900	646,211	70,261	8,32E-02	4,000
10	74,165	727,258	79,073	8,36E-02	4,500
11	81,879	802,902	87,297	8,40E-02	5,000
12	89,593	878,545	95,521	8,45E-02	5,625
13	96,756	948,785	103,159	8,50E-02	6,250
14	105,021	1029,832	111,970	8,55E-02	6,875
15 (fallo)	113,286	1110,879	120,782	8,65E-02	8,125

- Ensayo de tracción de la película 4 de almidón termoplástico elaborada a partir de la mezcla 4 con 15 % en masa de microfibras de celulosa respecto a la cantidad de almidón con base seca, probeta 3

N	Masa aplicada [kg]	Fuerza aplicada [N]	Tensión Nominal, σ [kPa]	Elongación [m]	Deformación Nominal, ϵ [%]
1	0,000	0,000	0,000	8,00E-02	0,000
2	4,518	44,305	4,845	8,00E-02	0,000
3	18,293	179,383	19,615	8,15E-02	1,875
4	26,007	255,027	27,886	8,20E-02	2,500
5	33,170	325,267	35,567	8,25E-02	3,125
6	40,884	400,910	43,838	8,29E-02	3,625
7	48,598	476,554	52,109	8,35E-02	4,375
8	56,533	554,359	60,617	8,41E-02	5,125

Continuación del apéndice 4.

9	64,798	635,405	69,479	8,50E-02	6,250
10	73,063	716,452	78,341	8,55E-02	6,875
11 (fallo)	80,777	792,095	86,613	8,65E-02	8,125

- Tensión de rotura máxima para cada película de almidón termoplástico realizada con las mezclas 1, 2, 3 y 4

Micro fibras de celulosa en mezcla (μf) [% $m_{\mu\text{f}}/m_{\text{al}}$]	Tensión de rotura máxima σ_r [kPa]	Tensión de rotura σ_r [kPa]
0	141,652	118,614
5	129,564	102,177
10	109,195	96,052
15	120,782	107,310

- Deformación máxima por muestra y la deformación máxima para cada película de almidón termoplástico realizada con las mezclas 1, 2, 3 y 4

Micro fibras de celulosa en mezcla (μf) [% $m_{\mu\text{f}}/m_{\text{al}}$]	Deformación máxima ϵ_r [%]	Deformación máxima ϵ_r [%]
0	23,75	18,75
5	13,75	12,91666667
10	12,5	10
15	10	8,75

- Ordenamiento de datos para el análisis de varianza sobre la tensión de rotura para cada película de almidón termoplástico realizada en las mezclas 1, 2, 3 y 4

Grupos	Repeticiones	Suma	Promedio	Varianza
Mezcla 1	3	355,843	118,614	735,903
Mezcla 2	3	306,532	102,177	629,029
Mezcla 3	3	288,155	96,052	129,657
Mezcla 4	3	321,931	107,310	331,049

Continuación del apéndice 4.

- Análisis de varianza sobre la tensión de rotura para cada película de almidón termoplástico realizada con las mezclas 1, 2, 3 y 4

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	823,253	3	274,417	0,60	0,632	4,066
Dentro de los grupos	3651,275	8	456,409	1		
Total	4474,529	11				

- Odenamiento de datos para el análisis de varianza sobre la deformación máxima de cada película de almidón termoplástico realizada con las mezclas 1, 2, 3 y 4

Grupos	Repeticiones	Suma	Promedio	Varianza
MEZCLA 1	3	56.25	18.75	20.3125
MEZCLA 2	3	38.75	12.9166667	2.08333333
MEZCLA 3	3	30	10	5.078125
MEZCLA 4	3	26.25	8.75	1.171875

- Análisis de varianza sobre la deformación máxima de cada película de almidón termoplástico realizada con las mezclas 1, 2, 3 y 4

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	178,515625	3	59,5052083	8,30909091	0,00769444	4,06618055
Dentro de los grupos	57,2916667	8	7,16145833			
Total	235,807292	11				

Continuación del apéndice 4.

- Porcentaje de degradación en medio acuoso de una película de almidón termoplástico y películas de almidón termoplástico con refuerzo de microfibras de celulosa

Celulosa	Muestra 1			Muestra 2			Muestra 3		
	m_0 [g]	m_f [g]	Δm_d [%]	m_0 [g]	m_f [g]	Δm_d [%]	m_0 [g]	m_f [g]	Δm_d [%]
0 %	15,00	9,00	40,00	9,00	6,00	33,33	18,00	14,00	22,22
5 %	16,00	10,00	37,50	19,00	15,00	21,05	23,00	18,00	21,74
10 %	21,00	14,00	33,33	25,00	19,00	24,00	19,00	17,00	10,53
15 %	26,00	18,00	30,77	20,00	17,00	15,00	24,00	23,00	4,17

- Odenamiento de datos para el análisis de varianza del porcentaje de degradación en medio acuoso de una película de almidón termoplástico con refuerzo de microfibras de celulosa

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Mezcla 1	3	95,556	31,852	80,658
Mezcla 2	3	80,292	26,764	86,565
Mezcla 3	3	67,860	22,620	131,469
Mezcla 4	3	49,936	16,645	178,954

- Análisis de varianza del porcentaje de degradación de una película de almidón termoplástico y películas de almidón termoplástico con refuerzo de microfibras de celulosa

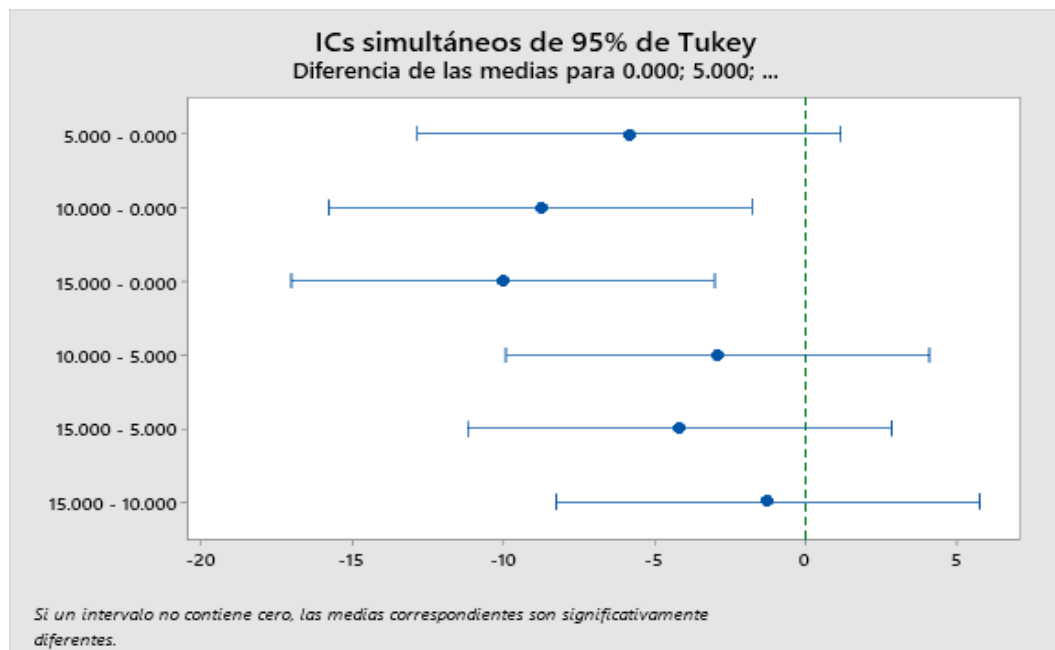
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	373,208	3	124,403	1,042	0,425	4,066
Dentro de los grupos	955,293	8	119,412			
Total	1328,501	11				

Continuación del apéndice 4.

- Test de Tukey para identificación de diferencia significativa entre medias para la deformación elástica de películas de almidón termoplástico con refuerzo de celulosa

Factor	N	Media	Agrupación	
0,000	3	18,75	A	
5,000	3	12,917	A	B
10,000	3	10,00		B
15,000	3	8,750		B

- Diferencia de medias para la deformación elástica de películas de almidón termoplástico con refuerzo de celulosa



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Proporciones de mezcla para la elaboración de una película de almidón termoplástico**

- Cálculo de la composición de mezcla de hidrogel para elaboración de una película de almidón termoplástico sin refuerzo de celulosa

Reactivo	% en masa	Variables
Agua	72,70 %	mA [g]
Almidón	17,27 %	mAl [g]
Glicerina	8,52 %	mG [g]
Ácido Acético	1,5 %	mAA[g]

- Cálculo de la composición de mezcla de hidrogel para elaboración de una película de almidón termoplástico refuerzo de celulosa

Reactivo	% en masa	
Agua	72,70 %	mA [g]
Almidón	17,27 %	mAl [g]
Glicerina	8,52 %	mG [g]
Ácido Acético	1,5 %	mAA[g]
Micro fibras de la estopa de coco	5 %* mAl [g]	mC[g]

- Cálculo de la composición de mezcla de hidrogel para elaboración de una película de almidón termoplástico refuerzo de celulosa

Reactivo	% en masa de h	
Agua	72,70 %	mA [g]
Almidón	17,27 %	mAl [g]
Glicerina	8,52 %	mG [g]
Ácido Acético	1,5 %	mAA[g]
Micro fibras de la estopa de coco	10 %* mAl [g]	mC[g]

Continuación del apéndice 5.

- Cálculo de la composición de mezcla de hidrogel para elaboración de una película de almidón termoplástico refuerzo de celulosa

Reactivo	% en masa de h	
Agua	72,70 %	mA [g]
Almidón	17,27 %	mAl [g]
Glicerina	8,52 %	mG [g]
Ácido Acético	1,5 %	mAA [g]
Micro fibras de la estopa de coco	15 %* mAl [g]	mC [g]

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6: **Caracterización cualitativa de las propiedades de una película de almidón termoplástico reforzado con micro fibras de celulosa**

Mezcla	Color	Textura	Transparencia
1	Marrón claro	Superficie lisa, presencia de burbujas de aire	25 %
2	Marrón	Superficie rugosa	20 %
3	Marrón oscuro	Superficie rugosa	5 %
4	Marrón muy oscuro	Superficie rugosa	0%

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. **Caracterización física de las probetas sometidas a ensayo de tracción**

- Caracterización física de las probetas propiedades de una película de almidón termoplástico sin reforzado con microfibras de celulosa, película 1

Película	1		
Probeta	1	2	3
Largo [mm]	131,2	131,2	131,2
Ancho en los extremos [mm]	70	70	70
Ancho en el centro [mm]	43,7	43,7	43,7
Espesor [mm]	1,88	2,02	2,02

- Caracterización física de las probetas propiedades de una película de almidón termoplástico sin reforzado con microfibras de celulosa, película 2

Película	2		
Probeta	1	2	3
Largo [mm]	131,2	131,2	131,2
Ancho en los extremos [mm]	70	70	70
Ancho en el centro [mm]	43,7	43,7	43,7
Espesor [mm]	2,06	2,89	2,195

Continuación del apéndice 7.

- Caracterización física de las probetas propiedades de una película de almidón termoplástico sin reforzado con microfibras de celulosa, película 3

Película	3		
Probeta	1	2	3
Largo [mm]	131,2	131,2	131,2
Ancho en los extremos [mm]	70	70	70
Ancho en el centro [mm]	43,7	43,7	43,7
Espesor [mm]	2,01	2,03	2,03

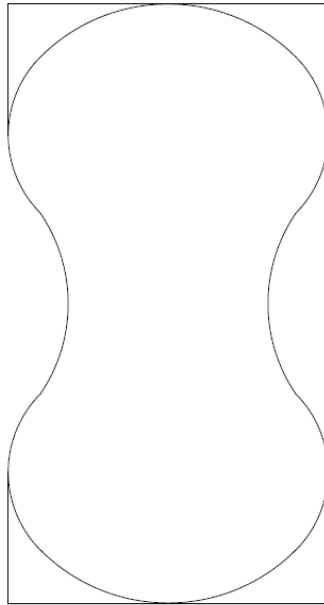
- Caracterización física de las probetas propiedades de una película de almidón termoplástico sin reforzado con microfibras de celulosa, película 4

Película	4		
Probeta	1	2	3
Largo [mm]	131,2	131,2	131,2
Ancho en los extremos [mm]	70	70	70
Ancho en el centro [mm]	43,7	43,7	43,7
Espesor [mm]	2,52	2,17	1,56

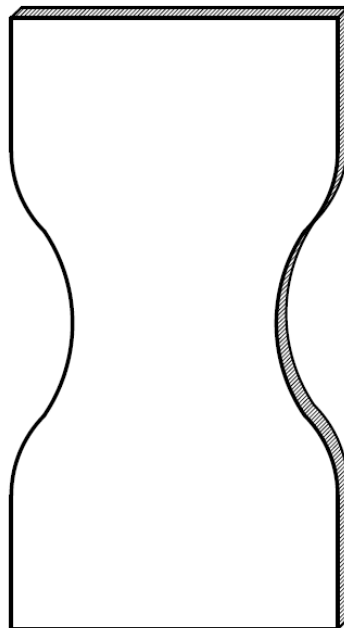
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. **Diseño de las probetas para los ensayos de tracción**

- Detalle de las probetas para los ensayos de tracción



- Vista isométrica de las probetas para los ensayos de tracción



Fuente: elaboración propia, empleando Civil 3D 2017.

Apéndice 9. **Fotos del procedimiento experimental**

- Preparación de los reactivos para la elaboración de una película de almidón termoplástico



- Mezcla del hidrogel para elaborar una película de almidón termoplástico con refuerzo de microfibras de celulosa



Continuación del apéndice 9.

- Punto de gelatinización de la mezcla de almidón termoplástico con refuerzo de microfibras de celulosa



- Gelatinización completa de la mezcla de almidón termoplástico con refuerzo de microfibras de celulosa

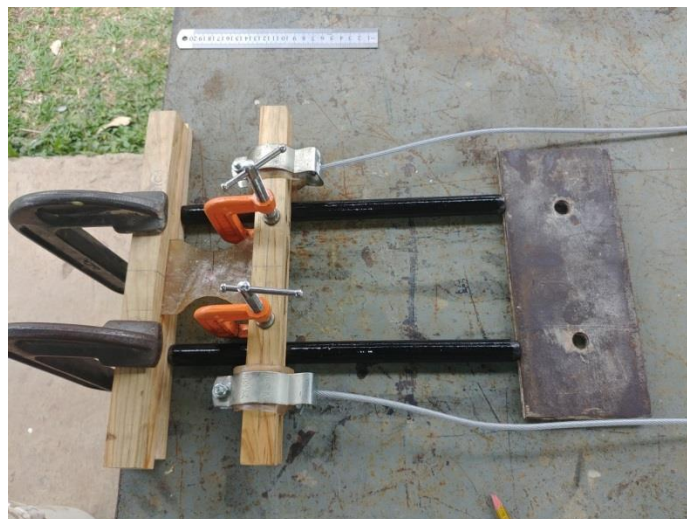


Continuación del apéndice 9.

- Sistema para ensayo de tracción realizado a probetas de almidón termoplástico



- Sistema para ensayo de tracción realizado a probetas de almidón termoplástico



Continuación del apéndice 9.

- Sistema para ensayo de tracción realizado a probetas de almidón termoplástico

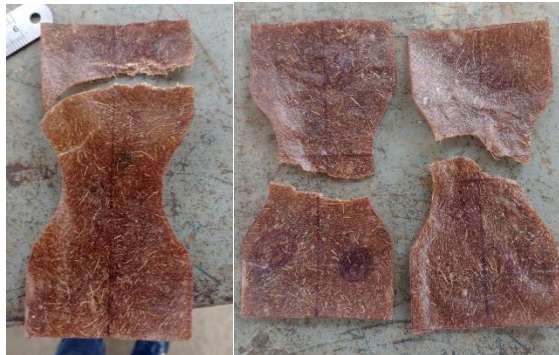


- Probetas de almidón termoplástico antes y después de realizar el ensayo de tracción



Continuación del apéndice 9.

- Probetas de almidón termoplástico con refuerzo de celulosa de 5 % en masa respecto al contenido de almidón con base seca después de realizar el ensayo de tracción



- Probetas de almidón termoplástico con refuerzo de celulosa de 10 % en masa respecto al contenido de almidón con base seca después de realizar el ensayo de tracción



Continuación del apéndice 9.

- Probetas de almidón termoplástico con refuerzo de celulosa de 15 % en masa respecto al contenido de almidón con base seca después de realizar el ensayo de tracción



- Muestras de almidón termoplástico con refuerzo de celulosa de a 0 %, 5 %, 10 % y 15 % en masa respecto al contenido de almidón con base seca antes de la prueba de degradación en medio acuoso



Continuación del apéndice 9.

- Muestras de almidón termoplástico con refuerzo de celulosa de a 0 %, 5 %, 10 % y 15 % en masa respecto al contenido de almidón con base seca después de la prueba de degradación en medio acuoso



Continuación del apéndice 9.

- Muestras de almidón termoplástico secas con refuerzo de celulosa de a 0 %, 5 %, 10 % y 15 % en masa respecto al contenido de almidón con base seca después de la prueba de degradación en medio acuoso



Continuación del apéndice 9.

- Secado de películas de almidón termoplástico



Fuente: elaboración propia.

