

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE CIENCIA ANIMAL
DEPARTAMENTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS



Influencia del termoconformado en las propiedades fisicoquímicas de envases biobasados reforzados con microcelulosa a diferentes grados de acetilación.

POR

NAYELI ESPINOSA HERNÁNDEZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título profesional de:

INGENIERO EN CIENCIA Y TECNOLOGIA DE ALIMENTOS

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Marzo 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE CIENCIA ANIMAL
DEPARTAMENTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

Influencia del termoconformado en las propiedades fisicoquímicas de envases biobasados reforzados con microcelulosa a diferentes grados de acetilación.

POR

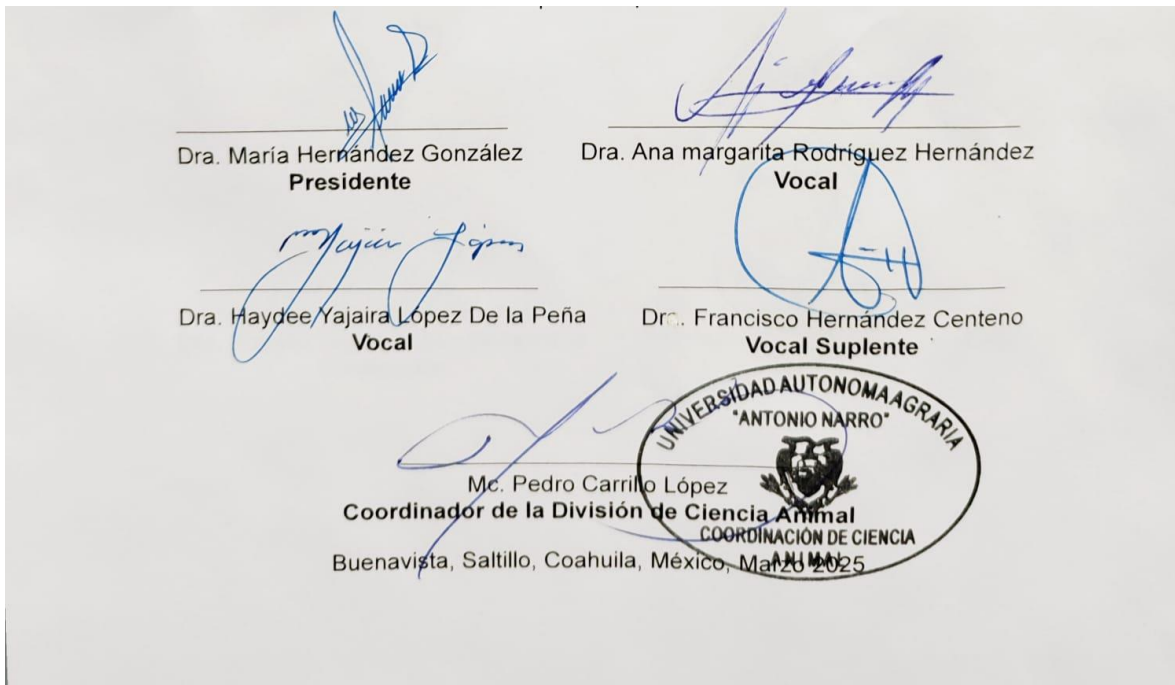
NAYELI ESPINOSA HERNÁNDEZ

TESIS

Que se somete a consideración del H. Jurado Examinador como requisito parcial para obtener el título profesional de:

INGENIERO EN CIENCIA Y TECNOLOGIA DE ALIMENTOS

Aprobada por:



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE CIENCIA ANIMAL
DEPARTAMENTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

Influencia del termoconformado en las propiedades fisicoquímicas de envases biobasados reforzados con microcelulosa a diferentes grados de acetilación.

POR



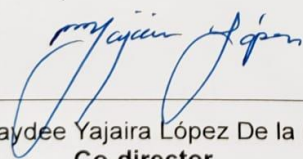
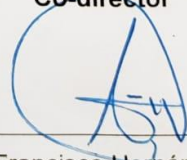
NAYELI ESPINOSA HERNÁNDEZ

TESIS

Que se somete a consideración del H. Jurado Examinador como requisito parcial para obtener el título profesional de:

INGENIERO EN CIENCIA Y TECNOLOGIA DE ALIMENTOS

Fue dirigida por el siguiente comité:

 _____ Dra. María Hernández González Director	 _____ Dra. Ana margarita Rodríguez Hernández Co-director
 _____ Dra. Haydee Yajaira López De la Peña Co-director	 _____ Dra. Francisco Hernández Centeno Co-director

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México, Marzo 2025

Declaración de no plagio

El autor quien es responsable directo, jura bajo protesta decir la verdad, que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos: Reducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (copiado y pegado); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como copia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin comillas; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, graficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente.

En este sentido, lo anterior puede ser confirmado por el lector, estando consciente de que, en caso de comprobarse plagio en el texto, no respetar los derechos de autor, edición o modificación, será sancionado por las autoridades correspondientes. Por lo anterior me responsabilizo de las consecuencias generadas en caso de existir cualquier tipo de plagio y declaro que este trabajo es original.

ATENTAMENTE



Nayeli Espinosa Hernández

AGRADECIMIENTO

Agradezco infinitamente a Dios por bendecirme siempre, darme la sabiduría e inteligencia para poder culminar esta importante etapa de mi vida, por guiarme por el camino correcto y permitirme llegar hasta donde me encuentro ahora.

A mis padres, **Irene Hernandez Hernandez** y **Gabriel Espinoza Santiago**, quienes han sido mi pilar y mi mayor fuente de fuerza para salir adelante. Gracias por su apoyo incondicional, por su amor inmenso y por enseñarme a luchar siempre, sin rendirme, ante cualquier adversidad. No me alcanzará la vida para agradecerles todo lo que han hecho por mí; su sacrificio, dedicación y ejemplo han sido esenciales en cada paso que he dado. Este logro es, sin duda, el reflejo de su esfuerzo y de todo lo que me han brindado a lo largo de mi vida.

A mi hermano **Luis Gabriel Espinoza Hernandez** por su amor, su apoyo incondicional y por ser uno de mis pilares para salir adelante.

A mi segunda casa, la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro**, por formarme profesionalmente y por darme una segunda familia que me acompañaron en todo momento.

A la **Dra. María Hernández González** por brindarme su apoyo y conocimientos, por la confianza que ha demostrado hacia mí a lo largo del desarrollo de este proyecto.

A la **Dra. Ana Margarita Rodríguez Hernández** por su gran apoyo y confianza durante mi estancia en el Centro de Investigación en Química Aplicada.

A las **Dras. Haydee Yajaira López de la Peña** y al **M.P. Francisco Hernández Centeno** por su ayuda y colaboración en la presente investigación siendo indispensable su aportación.

A **Mónica Daniela Alvarado** por brindarme sus conocimientos y apoyo a lo largo de este proyecto siendo indispensable para llevar a cabo varios procesos requeridos para el desarrollo de este.

Al **Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA)**, por abrir sus puertas para poder llevar a cabo este proyecto, por su apoyo al facilitar sus instalaciones, laboratorios y equipos de trabajo. Al **Dr. José Alberto Rodríguez González**, del departamento de procesos de transformación de plásticos por su apoyo y compartir

su conocimiento en los procesos realizados. Al **Dr. Víctor Javier Cruz Delgado** y al **Dr. Jesús Francisco Lara Sánchez**, del departamento de procesos de transformación de plásticos por su apoyo técnico en las pruebas realizadas.

Al **Dr. Uriel Alejandro Sierra Gómez** y al **Ing. Jesús Alfonso Mercado Silva**, del laboratorio nacional de materiales grafénicos por su apoyo técnico en las pruebas realizadas y permitirme trabajar con algunos de sus equipos. A la **Lic. Julieta Sánchez Salazar**, la **Lic. María Guadalupe Méndez Padilla** y la **MC Myrna Salinas Hernández**, del laboratorio central de instrumentación analítica por su apoyo y orientación técnica en el análisis de muestras. A la **Dra. Yolanda Ortega Ortega** del Departamento de Biociencias y Agrotecnología por su apoyo técnico en las pruebas realizadas. A la **MC Bertha Alicia Puente Urbina** por su apoyo al permitirme trabajar con algunos de sus equipos y orientación técnica.

A mi mejor amigo **Lesem Itiel Jonguitud Perez** por su gran amistad, por apoyarme en sus posibilidades y compartir grandes momentos durante la etapa universitaria. A mi mejor amiga **Ady Hernández Pedraza** por su gran cariño y amistad por su apoyo y estar conmigo en todo momento. Gracias a ambos por compartir esta gran etapa conmigo y convertirse en mi segunda familia.

A mis amigos: **Dalay Jasso**, **Karla Rivera**, **Abigail Hernández** y **Andrés Espejo** por siempre brindarme su apoyo, por las aventuras que vivimos y sobre todo por mostrarme una sincera amistad.

DEDICATORIAS

No encuentro palabras suficientes para expresar todo el amor y gratitud que siento por las personas más importantes de mi vida: mi familia. Agradezco a Dios profundamente por bendecirme con una familia tan maravillosa y por permitirme alcanzar esta nueva meta.

Dedico esta tesis a mis padres Irene Hernández Hernández y Gabriel Espinoza Santiago, quienes siempre han sido mi fuente de inspiración y fortaleza. Los admiro profundamente y los amo con todo mi corazón. Gracias por su amor incondicional, por sus sacrificios y por ser mi mayor apoyo en cada etapa de mi vida. Su enseñanza constante, su ejemplo de perseverancia y su capacidad para afrontar cualquier dificultad me han mostrado el verdadero significado de la dedicación y el esfuerzo. Cada logro que consigo es un reflejo de su amor y su dedicación, y esta tesis es también un testimonio de su entrega.

A mi hermano Luis Gabriel Espinoza Hernández, quien siempre ha estado a mi lado, apoyándome en cada paso del camino. Gracias por tu amor, por tus palabras de aliento y por tu confianza inquebrantable en mí. Tu presencia ha sido una gran motivación para seguir adelante.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO	5
DEDICATORIAS	7
ÍNDICE GENERAL	8
ÍNDICE DE TABLAS	11
ÍNDICE DE FIGURAS	12
RESUMEN	13
I. INTRODUCCIÓN	15
II. JUSTIFICACIÓN	17
III. HIPÓTESIS	18
IV. OBJETIVOS	19
V. MARCO DE REFERENCIA	20
5.1 Empaques alimentarios	20
5.1.1 Definición y tipos	20
5.2 Empaques de acuerdo con su Función	22
5.2.1 Empaques pasivos	23
5.2.2 Empaques inteligentes	23
5.2.3 Empaques activos	24
5.3 Biomateriales para el desarrollo de empaques	27
5.3.1 Almidones	27
5.3.2 Fibras	28
5.3.3 Polisuccinimida	28
5.3.4 Agentes plastificantes	29
5.4 Prospectiva de los empaques biodegradables	30
5.4.1 Impacto ambiental	30
5.4.2 Propiedades mecánicas	30
5.4.3 Biocompositos	32
5.5 Formas de elaboración	33
5.5.1 Extrusión	33
5.5.2 Termoconformado	33
5.5.3 Termoformado	34

5.6	Caracterización fisicoquímica.....	34
5.6.1	FTIR	34
5.6.2	Propiedades mecánicas.....	35
VI.	MATERIALES Y MÉTODOS	36
6.1	Obtención de los materiales base.....	36
6.1.1	Polisuccinimida (PSI)	36
6.1.2	Microcelulosa (MC)	37
6.1.3	Almidón	38
6.2	Elaboración de probetas	39
6.2.1	Preparación de la formulación.....	39
6.2.2	Extrusión.....	39
6.2.3	Termoconformado.....	40
6.2.4	Termoformado.....	41
6.3	Caracterización fisicoquímica de los materiales base y envases generados.....	41
6.3.1	Grados de sustitución de la MC y ST acetilados	42
6.3.2	Espectroscopía infrarroja por transformadas de Fourier (FTIR).....	42
6.3.3	Propiedades mecánicas.....	43
VII.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	44
7.1	Establecimiento de condiciones de termoconformado y termoformado	44
7.1.1	Condiciones de termoconformado	44
7.1.2	Condiciones de termoformado	45
7.2	Caracterización química de los materiales base	45
7.2.1	FTIR de la PSI	46
7.2.2	FTIR de la MC.....	47
7.2.3	FTIR del almidón.....	48
7.2.4	FTIR de probetas termoconformadas	50
7.2.5	FTIR de probetas termoformadas	51
7.2.6	Grados de sustitución y porcentaje de acetilo de la Microcelulosa acetilada	53
7.2.7	Grados de sustitución y porcentaje de acetilo del Almidón acetilado.....	54
7.3	Evaluación de propiedades mecánicas.....	54

7.3.1	Tensión a la ruptura	55
7.3.2	Porcentaje de elongación.....	56
7.3.3	Módulo elástico	58
VIII.	CONCLUSIÓN	60
IX.	BIBLIOGRAFÍA	61
X.	ANEXOS	69
10.1	Estudio estadístico de pruebas mecánicas	69
10.1.1	Anexo 1. Tensión a la ruptura	69
10.1.2	Anexo 2. Porcentaje de elongación	69
10.1.3	Anexo 3. Módulo elástico	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Formulaciones de las probetas realizadas.....	39
Tabla 2 Condiciones de extrusión.....	39
Tabla 3 Condiciones de termoconformado.....	40
Tabla 4 Condiciones de termoformado	41
Tabla 5 Parámetros de pruebas mecánicas.....	43
Tabla 6 Condiciones de termoconformado establecidas	44
Tabla 7 Condiciones de termoformado establecidas.....	45
Tabla 8 Grados de sustitución y porcentaje de acetilo del Almidón acetilado a 5 h	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Espectroscopia de Infrarrojo por Transformadas de Fourier (FTIR) de la PSI	46
Figura 2 Espectroscopia de Infrarrojo por Transformadas de Fourier (FTIR) de muestras de microcelulosa nativa y acetiladas. MC 0, microcelulosa sin acetilar; MCA 3, microcelulosa acetilada por 3 h; MCA 5, microcelulosa acetilada por 5 h.	47
Figura 3 Espectroscopia de Infrarrojo por Transformadas de Fourier (FTIR) de muestras de almidón de maíz nativo y acetilados. A 0, almidón sin acetilar; AA 5, almidón acetilado por 5 h	49
Figura 4 Espectroscopia de Infrarrojo con Transformadas de Fourier (FTIR) de las probetas termoconformadas. MA, probeta con materiales sin acetilar; MB, probeta con microcelulosa 0 h y almidón acetilado por 5 h; MC, probeta con microcelulosa acetilada por 3 h y almidón por 5h; ME, probeta con microcelulosa por 5h y almidón 0h; MF, probeta con microcelulosa acetilada 5h y almidón 5h	50
Figura 5 Espectroscopia de Infrarrojo con Transformadas de Fourier (FTIR) de las probetas termoformadas. MA, probeta con materiales sin acetilar; MB, probeta con microcelulosa 0 h y almidón acetilado por 5 h; MC, probeta con microcelulosa acetilada por 3 h y almidón 0h; Md, probeta con microcelulosa acetilada 3h y almidón 5h; mf probeta con microcelulosa acetilada por 5h y almidón 5h	52
Figura 6 Porcentaje de acetilo de microcelulosa acetilada por 3 h, microcelulosa acetilada por 5 h	53
Figura 7 Grados de sustitución de microcelulosa acetilada por 3 h, microcelulosa acetilada por 5 h	53
Figura 8 tensión a la ruptura	55
Figura 9 Porcentaje de elongación	56
Figura 10 Modulo de elasticidad	58

RESUMEN

La creciente preocupación por la contaminación ambiental ha impulsado una mayor demanda para creación de empaques biodegradables, como alternativa a los derivados del petróleo, que son responsables de generar grandes cantidades de residuos no biodegradables. Los biopolímeros, que son materiales principalmente elaborados a partir de recursos naturales como almidón, proteínas y celulosa, se presentan como una solución prometedora debido a su capacidad de descomposición en el medio ambiente, lo que los convierte en opciones más sostenibles.

A pesar de sus ventajas, uno de los principales retos de los biopolímeros es que, en su forma pura, no cuentan con las propiedades mecánicas necesarias para ser utilizados en diversas aplicaciones industriales. Esto limita su manipulación y uso en la fabricación de productos que requieren características específicas de resistencia y durabilidad. Por esta razón, se ha intensificado la investigación para encontrar formas de mejorar sus propiedades mediante la incorporación de refuerzos naturales, como fibras vegetales, que pueden proporcionar la rigidez y la resistencia necesarias sin comprometer su biodegradabilidad.

El objetivo de este estudio fue evaluar las propiedades mecánicas de un biocompósito basado en polisuccinimida, almidón, microcelulosa extraída de fibras de lechuguilla en diferentes grados de acetilación y aceite esencial de orégano teniendo como agente plastificante el glicerol. Para integrar estos materiales, se utilizó un proceso de extrusión, seguido de un moldeado mediante termoconformación, para finalmente realizar un proceso de termoformado.

Las probetas obtenidas fueron analizadas en aspectos de densidad, espectroscopía infrarroja por transformadas de Fourier (FTIR), % de acetilo y grados de sustitución y finalmente su desempeño mecánico mediante el uso de un texturometro Brookfield C3.

Los resultados de caracterización química evidenciaron bandas representativas de los materiales base utilizados, destacándose la banda cercana a los 3200 cm^{-1} representativa de los grupos hidroxilo y a los 1700 cm^{-1} que evidencia la presencia de grupos acetilo presentes en la muestra. En cuanto a los grados de sustitución y

% de acetilo se marcaron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) entre todos los tratamientos. La microcelulosa expuesta por 5 h a la reacción de esterificación presentó el mayor grado de sustitución y % de acetilación en comparación de la microcelulosa expuesta 3 h.

En lo referente a las propiedades mecánicas realizando una comparación entre los procesos de termoconformado y termoformado. En el análisis de elasticidad se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) entre ambos procesos, obteniendo valores más altos para las probetas termoformadas con valores de 0.1899 Mpa en la probeta TFA, seguida de la probeta TFD con 0.1671 Mpa y TFC con un valor 0.162 Mpa. Por otra parte, en el análisis de porcentaje de elongación no se presentaron diferencias estadísticamente significativas encontrando que las mezclas TFB y TFF para ambos procesos fueron los que presentaron los valores más elevados para este parámetro. Finalmente, en el análisis de modulo elástico se presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) entre ambos procesos, obteniendo valores más altos las probetas termoformadas con valores de 0.0764 Mpa en la probeta TFC seguida de la probeta TFA con un valor de 0.0669 Mpa.

Palabras clave: microcelulosa, polisuccinimida, almidón, aceite esencial, pruebas mecánicas.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la contaminación generada por los envases sintéticos utilizados en la industria alimentaria representa un desafío ambiental significativo. Estos envases, derivados principalmente del petróleo, contribuyen a la acumulación de residuos no biodegradables, lo que agrava el problema de la contaminación global. Ante esta problemática, ha surgido la necesidad urgente de buscar soluciones sostenibles que ayuden a aminorar el impacto ambiental de los empaques convencionales

Una de las alternativas más prometedoras es el uso de materiales biodegradables para la producción de empaques, los cuales buscan reemplazar o reducir considerablemente el uso de plásticos derivados del petróleo (Wang et al., 2022a).

Los empaques biodegradables están evolucionando para incorporar propiedades adicionales, como la capacidad de actuar como portadores de agentes activos. Estos pueden incluir sustancias antifúngicas, antimicrobianas, antioxidantes lo que amplía su funcionalidad y los hace especialmente útiles en la conservación de alimentos altamente perecederos. De esta manera, los envases no solo cumplen su rol de protección, sino que también contribuyen a prolongar la vida útil de los productos alimentarios y mejorar su seguridad.

A pesar de sus ventajas medioambientales y funcionales, los empaques biodegradables suelen presentar una resistencia inferior en comparación con los materiales convencionales. Los biocompuestos, como también se nombran los materiales biodegradables, están formados por un material reforzante y un material que ayude a la polimerización dicho material que ayuda a reforzar el cual sintetizado a partir de otro.

Existen una gran variedad de especies naturales que pueden ser utilizadas como materiales de refuerzo, los cuales se incorporan al producto base para mejorar sus propiedades. Se han llevado a cabo numerosos estudios para explorar las propiedades de diversas plantas silvestres que pueden servir como materiales de refuerzo. Entre los más investigados se encuentran el bagazo de caña de azúcar, los residuos de madera y diferentes especies de agaves. El objetivo principal de estas investigaciones es obtener información detallada sobre las características y

beneficios que cada uno de estos materiales naturales puede aportar, como la mejora de la resistencia mecánica (Hernandez, n.d.)

En la presente investigación, se desarrolló un biocomposito a base de polisuccinimida (PSI), microcelulosa (MC) obtenida a partir del agave de Lechuguilla, Almidón (ST), glicerol como plastificantes y Aceite esencial de Orégano (AEO) como un agente funcionalizante. Evaluando sus propiedades químicas y mecánicas.

II. JUSTIFICACIÓN

El uso de biomateriales en la creación de empaques ha surgido como una solución alternativa a los plásticos convencionales, especialmente en aplicaciones industriales. Esta tendencia se debe al creciente interés por controlar los riesgos medioambientales causados por el uso excesivo de plásticos, que son responsables de la contaminación y del aumento de desechos no biodegradables. Además, la demanda de alimentos empacados continúa aumentando, lo que hace necesario buscar soluciones más sostenibles para su conservación.

No obstante, un biomaterial en comparación con un material sintético cuenta con la principal desventaja de no poseer las propiedades mecánicas necesarias para sustituir al polímero sintético. Para ello se tiene el interés de incorporar materiales que sean naturales con propiedades similares a las que brinda un polímero sintético. La clave está en desarrollar biomateriales que no solo sean biodegradables, sino también funcionales, con características como la resistencia y flexibilidad necesarias para reemplazar de manera eficiente a los plásticos convencionales, sin comprometer la calidad o la seguridad de los productos empacados. Este enfoque no solo busca aminorar los problemas medioambientales causados por los plásticos, sino también garantizar que los nuevos materiales sean capaces de cumplir con los mismos estándares de rendimiento y conservación que ofrecen los polímeros sintéticos.

Por lo cual la presente investigación se orientó al desarrollo y la evaluación de nuevos envases biobasados reforzados con microcelulosa extraída de fibras de lechuguilla manejada diferentes grados de acetilación para su posterior análisis de propiedades fisicoquímicas.

III. HIPÓTESIS

H₀: El proceso de fabricación, termoconformado o termoformado, impactará significativamente en las propiedades mecánicas de los biocompuestos para el desarrollo de empaques activos.

H_a: El proceso de fabricación, termoconformado o termoformado, no impactará significativamente en las propiedades mecánicas de los biocompuestos para el desarrollo de empaques activos.

IV. OBJETIVOS

Objetivo General

Evaluar la influencia en las propiedades fisicoquímicas de dos procesos de formado para la obtención de un envase biobasado.

Objetivos específicos

- Obtener los biomateriales base: polisuccinimida, microcelulosa a diferentes grados de acetilación, almidón nativo y acetilado.
- Elaboración de los envases mediante procesos de integración de los materiales base por extrusión, y su posterior formado por termoconformado y termoformado.
- Caracterización de los materiales base y los envases generados.

V. MARCO DE REFERENCIA

5.1 Empaques alimentarios

El empaque alimentario es una parte integral en la industria alimentaria el cual se ha venido utilizando desde hace muchos años, juega un papel muy importante en la seguridad alimentaria, este cumple con diversas funciones sirve como protección contra daños físicos, químicos y biológicos a los alimentos. También son útiles para prevenir la pérdida de aroma, sabor, presentan actividades antimicrobianas y antioxidantes. Previenen la pérdida de oxígeno, dióxido de carbono y humedad y, por lo tanto, son útiles para aumentar la vida útil de los alimentos y mejorar la integridad mecánica y las características de manipulación de los alimentos (Gupta et al., 2022). Un alimento debidamente resguardado en un empaque apropiado garantizara la seguridad, la higiene y consecuentemente se reduce activamente el desperdicio de alimentos (Trajkovska Petkoska et al., 2021)

Desde hace años, se han empleado diversos materiales para la fabricación de empaques, como plástico, vidrio, metales y papel. En la actualidad, debido a la alta demanda del consumidor, los empaques, deben tener funciones adicionales a las de ser solamente un contenedor pasivo, adaptando así funciones activas que permitan extender de manera efectiva la vida útil de los productos, conservar sus nutrientes y reducir la contaminación microbiana durante el transporte y almacenamiento. A su vez, con la creciente preocupación por los efectos negativos de los residuos de empaques alimentarios en el medio ambiente, se están desarrollando alternativas sostenibles y ecológicas para la fabricación de estos, con el fin de minimizar el impacto ambiental (Wang et al., 2022b).

5.1.1 Definición y tipos

El empaque es una parte integral de la industria alimentaria asociada con la calidad y seguridad de los alimentos, su principal función es contener el producto y facilitar su manipulación, transporte, almacenamiento y comercialización. Además de brindar protección y preservar la calidad de su contenido, protege el producto de diferentes causas de pérdida, incluidas lesiones mecánicas, físicas y patológicas del entorno circundante (Ait-Oubahou et al., 2019), proporciona garantía de

seguridad durante la comercialización y contribuye de manera importante en la aceptabilidad del producto (Yan et al., 2022).

El empaque alimentario debe cumplir con una serie de especificaciones para garantizar su efectividad. Algunas de estas características incluyen ser impermeable, no tóxico e inerte frente a los microorganismos. Además, debe cumplir con la función de estandarizar, promocionar y proporcionar información útil a los consumidores (Al-Tayyar et al., 2020).

Hoy en día los empaques alimentarios han evolucionado en gran medida empleando nuevas tecnologías para la creación de estos, como lo son los empaques activos, asépticos, inteligentes, bioactivos y comestibles. Los avances de las tecnologías aplicadas en estos diferentes empaques ayudan a prevenir el deterioro de los alimentos al mantener el estándar alimentario al más alto nivel posible, lo que puede ayudar a satisfacer las necesidades de los consumidores a lo largo de toda la cadena de suministro de los productos (Sarkar & Aparna, 2020).

5.1.1.1 *Empaques sintéticos*

Los empaques alimentarios sintéticos son materiales obtenidos de productos químicos y polímeros artificiales, diseñados para envolver y resguardar los alimentos. Estos empaques proporcionan una barrera contra factores como la humedad, el oxígeno, la luz y los contaminantes, ayudando así a mantener la calidad y seguridad de los productos alimenticios. Los plásticos derivados del petróleo, como el polietileno (PE), polipropileno (PP), tereftalato de polietileno (PET) y policloruro de vinilo (PVC), son los materiales más utilizados en este tipo de empaques (Kola & Carvalho, 2023).

A medida que aumentan las preocupaciones medioambientales, se está promoviendo el desarrollo de alternativas más sostenibles, tales como empaques biodegradables y de origen biológico. No obstante, los empaques sintéticos siguen siendo la opción predominante en la industria alimentaria debido a su eficacia en la protección de los alimentos y su bajo costo.

5.1.1.2 *Empaques biodegradables*

El empaque biodegradable es aquel que es capaz de descomponerse en dióxido de carbono, metano, agua, compuestos inorgánicos o biomasa, siendo el mecanismo de descomposición dominante la acción enzimática de los microorganismos y que los productos resultantes pueden obtenerse y medirse en un periodo de un momento determinado (Fonseca-García et al., 2021; Tian & Bilal, 2020).

La existente preocupación medioambiental por la eliminación de empaques que aumentan el índice de contaminación ha llevado a buscar alternativas de uso de polímeros biodegradables para la fabricación de empaques alimentarios.

Los polímeros que se pueden utilizar para elaborar empaques biodegradables son combinaciones de proteínas, polisacáridos y lípidos, no son tóxicos y son amigables con el medio ambiente cuentan con considerables propiedades mecánicas y de barrera las cuales hacen que pueda degradarse en condiciones de compostaje. Además, son polímeros que pueden generarse a partir de fuentes naturales sostenibles y desechos del procesamiento agrícola y animal (Khodaei et al., 2021; Thulasingh et al., 2022).

5.1.1.3 *Empaques biobasados*

Los empaques biobasados son aquellos fabricados con materiales derivados de fuentes renovables, como plantas, almidón, celulosa, proteínas y ácidos grasos. A diferencia de los empaques convencionales, que dependen principalmente de derivados del petróleo, los empaques biobasados buscan reducir el impacto ambiental y mejorar la sostenibilidad del envasado de productos. Estos empaques pueden ser completamente biodegradables o compostables, lo que significa que se descomponen en el medio ambiente de manera más eficiente y sin dejar residuos tóxicos. Además de ser una opción más ecológica, los empaques biobasados pueden ofrecer ciertas propiedades de barrera, como la protección contra la humedad, el oxígeno y la luz, esenciales para la preservación de alimentos (Nesic et al., 2020; Perera et al., 2024; Wang et al., 2022a).

5.2 *Empaques de acuerdo con su Función*

En los últimos años se ha realizado una amplia gama de innovaciones de empaques alimentarios buscando nuevas alternativas de uso de diferentes materiales para

mejorar la forma, tamaño, materiales, peso, resistencia, comodidad, etc. así como también para mejorar la barrera protectora y alargar la vida útil del producto.

Hoy en día se han desarrollado empaques pasivos, activos, inteligentes y pasivos en atmosferas modificadas. Los empaques pasivos y activo interactúan directamente con el producto y su entorno para mejorar la vida útil y mantener la calidad de su contenido. El empaque inteligente es un tipo de empaque, está diseñado para proporcionar información relacionada con las características de calidad, seguridad, entorno e historial del contenido mediante sensores específicos colocados dentro del empaque (Ait-Oubahou et al., 2019; Bhargava et al., 2020).

5.2.1 Empaques pasivos

El empaque pasivo o mejor conocido como empaque tradicional es aquel que cumple la función de proteger, aislar y facilitar la manipulación del producto, y cumple los principios básicos de protección, conservación, comunicación y comodidad de manejo (Lydekaityte & Tambo, 2020).

Los envases de alimentos tradicionales son una barrera pasiva e inerte y los materiales que se utilizan ampliamente son plásticos a base de petróleo como el PVC, PET y el PE, que a menudo tienen las propiedades ideales para proteger los alimentos de estas condiciones ambientales (Kola & Carvalho, 2023).

5.2.2 Empaques inteligentes

El empaque inteligente es aquel que posee e incorpora tecnologías avanzadas para mejorar las funciones principales del paquete o añade nuevas funcionalidades en comparación con el embalaje convencional.

El empaque inteligente es definido como el sistema que detecta, comunica y monitorea las condiciones de los alimentos envasados para brindar información sobre la calidad, la seguridad y la historia de un producto durante el transporte y el almacenamiento. Por otra parte, es un sistema que puede tomar decisiones para aumentar la vida útil, notificar información, mejorar la calidad e informar daños y/o deterioro mediante la utilización de diversas técnicas inteligentes (Raju et al., 2020). Agrega la funcionalidad de detección, censado y registro de las condiciones e indicadores de calidad en que se almacena el alimento. Los indicadores comunes incluyen indicadores de frescura, de tiempo, temperatura y de integridad para

detectar fugas. De todos los parámetros de interés, se ha identificado que la humedad (actividad del agua), la temperatura y el pH son los tres factores más cruciales que afectan la calidad de los alimentos.

El embalaje inteligente puede basarse en cualquier tecnología química, eléctrica, electrónica, mecánica o digital conectada a una red o cualquier combinación de ellas. Así como también, el empaque inteligente utiliza dispositivos portadores de datos inteligentes, como códigos de barras y etiquetas de identificación por radiofrecuencia (RFID), que brindan información detallada sobre un producto al consumidor (Kalpana et al., 2019).

Los envases inteligentes se pueden dividir en tres sistemas principales: indicadores, sensores y soportes de datos.

Los indicadores determinan la presencia o ausencia de una sustancia, la duración de una reacción entre diferentes sustancias y la concentración de una sustancia específica. Generalmente los indicadores proporcionan información a través de un cambio visual. La mayoría de los indicadores se centran en la detección de tiempo-temperatura, frescura, formación de gas y proporcionan un cambio de color que el consumidor puede percibir fácilmente.

Los sensores son dispositivos electrónicos que se utilizan para detectar, localizar o cuantificar una alteración a través de un receptor que se traduce en una señal, mediante un transductor, que informa un cambio físico o químico (Rodrigues et al., 2021).

Los dispositivos de soporte de datos representan un tipo de empaque inteligente cuentan con una función diferente, no proporcionan ninguna información sobre el estado de calidad de los alimentos envasados, pero son un apoyo importante para la trazabilidad automatizada, la prevención de robos o la protección contra la falsificación (Drago et al., 2020).

5.2.3 Empaques activos

Los empaques activos son una innovación en la industria del envasado, diseñados para incorporar elementos que tienen la capacidad de interactuar con los alimentos o con su entorno. Estos componentes pueden liberar o absorber sustancias de manera controlada, con el fin de mejorar la conservación de los productos. Entre las

funciones más comunes de los empaques activos se incluyen la prevención de la contaminación microbiana y química, la regulación de la humedad, la absorción de oxígeno, la liberación de antioxidantes o conservantes naturales, y la prolongación de la frescura. Además, ayudan a mantener las propiedades visuales, sensoriales y organolépticas de los alimentos, como el sabor, la textura y el color, evitando que se deterioren prematuramente. Estos avances permiten no solo alargar la vida útil de los productos, sino también garantizar su seguridad, lo que resulta en una mejor experiencia para el consumidor (Anukiruthika et al., 2020; Drago et al., 2020; Raju et al., 2020).

Los sistemas de envasado activo se dividen en dos categorías principales según su funcionamiento: aquellos que absorben (depuradores) o liberan (emisores) gases para modificar activamente la atmósfera interna del envase. Los depuradores se utilizan para eliminar sustancias no deseadas del entorno interno del empaque, como oxígeno, humedad, etileno, dióxido de carbono, así como olores y sabores. En cambio, los emisores están diseñados para liberar compuestos beneficiosos, cuya presencia genera un efecto positivo dentro del empaque alimentario (Chawla et al., 2021).

5.2.3.1 Atrapadores de O₂

Los empaques alimentarios atrapadores de oxígeno (O₂) son una innovación clave en la industria alimentaria, diseñados para prolongar la frescura y vida útil de los productos al reducir la cantidad de oxígeno dentro del envase. El oxígeno es uno de los principales factores que aceleran la descomposición de los alimentos, ya que promueve la oxidación de grasas, vitaminas y otros compuestos esenciales, además de ser un medio favorable para el crecimiento de microorganismos como bacterias y hongos.

Estos empaques funcionan a través de la integración de materiales o aditivos que capturan el oxígeno presente en el interior del envase y lo mantienen atrapado, impidiendo que entre en contacto con los alimentos. Entre los métodos más comunes utilizados en estos empaques se encuentran las bolsas y películas con recubrimientos activos, los dispositivos de absorción de oxígeno y las atmósferas

modificadas, que ayudan a crear un ambiente con bajo contenido de oxígeno (Mills, 2005; Tafese Awulachew M, 2022)

5.2.3.2 Emisores

Los empaques alimentarios emisores son diseñados para mejorar la conservación y la calidad de los productos alimenticios. Estos empaques liberan, de manera controlada, gases o compuestos específicos dentro del envase con el fin de mantener el ambiente interno óptimo para la preservación de los alimentos.

Uno de los usos más comunes de los empaques emisores es la liberación de dióxido de carbono (CO₂) o compuestos antimicrobianos y emisores de etileno. El dióxido de carbono es eficaz en la inhibición del crecimiento de microorganismos como bacterias y hongos, mientras que ciertos compuestos antimicrobianos liberados pueden prevenir la proliferación de patógenos y reducir la oxidación de los alimentos. El etileno es un gas que se utiliza para controlar la maduración de frutas y verduras, prolongando así su vida útil al ralentizar su proceso de maduración (Tafese Awulachew M, 2022).

5.2.3.3 Antioxidantes

El sistema de envasado con antioxidantes activos incorpora agentes antioxidantes directamente en el material de embalaje, ofreciendo una alternativa a la adición de estos compuestos de manera directa en los alimentos (Kumar et al., 2021). Las propiedades antioxidantes son esenciales debido a los efectos perjudiciales de los radicales libres tanto en los alimentos como en el organismo. Considerando que la degradación oxidativa, que sigue al crecimiento microbiano, es la principal causa del deterioro alimentario, la incorporación de antioxidantes naturales en los envases constituye una estrategia eficaz para mejorar la estabilidad de los productos alimenticios sensibles a la oxidación (Lukic et al., 2020).

5.2.3.4 Antimicrobianos

El empaque antimicrobiano es un sistema diseñado para inhibir, inactivar o eliminar los patógenos y microorganismos que afectan a los alimentos. Su principal objetivo es controlar el crecimiento de estos microorganismos, lo que permite prolongar la vida útil, preservar la calidad y asegurar la seguridad de los productos. Esta función antimicrobiana se puede lograr incorporando agentes antimicrobianos al sistema de empaque, lo que permite un contacto indirecto con el alimento, o añadiendo dichos agentes a los polímeros utilizados en envases que están en contacto directo con los alimentos (Kim et al., 2022).

5.3 Biomateriales para el desarrollo de empaques

Como se ha mencionado la evolución en el desarrollo y las funciones realizadas por los empaques ha tenido importantes cambios, uno de ellos se refiere también al impacto que los desechos de estos han ocasionado al medio ambiente, por lo que uno de los retos actuales es el desarrollar empaques a partir de materiales que biodegradables. En este sentido los biomateriales son una alternativa que se ha venido explorando reciente mente, se entiende como biomaterial a aquel material que proviene de un ser vivo, o una sustancia que está en contacto con un organismo vivo sin ser perjudicial para este ni para el medio ambiente. Se consideran biomateriales aquellos materiales que son biobasados, biodegradables o que cumplen ambos requisitos. El término "biobasado" hace referencia a los materiales que se derivan total o parcialmente de productos biológicos, como el maíz, la celulosa o residuos orgánicos (Duffó, 2012).

Algunos biomateriales empleados en la fabricación de empaques biobasados se presentan a continuación.

5.3.1 Almidones

El almidón es el polisacárido natural más abundante, renovable y biodegradable, además de ser la principal fuente de carbohidratos, lo que lo convierte en un suministro esencial de energía para los seres humanos. Este compuesto se encuentra en forma de pequeños gránulos presentes en diversas partes de las

plantas, como semillas, frutos y tubérculos principalmente trigo, el arroz, las patatas y el maíz.

Los gránulos de almidón son semicristalinos y están compuestos principalmente por dos polisacáridos: amilosa y amilopectina. La amilopectina constituye el principal componente de la masa del almidón, mientras que la amilosa representa entre el 15% y el 30% de su composición (Vianna et al., 2021).

5.3.2 Fibras

Las fibras naturales tienen su origen en fuentes biológicas, que pueden ser vegetales, animales o minerales. Las fibras vegetales están compuestas de celulosa, lignina, hemicelulosas, aceite, ceras, proteínas y diferentes componentes solubles en agua, mientras que la celulosa, la lignina y las hemicelulosas son los constituyentes poliméricos primarios, esta se encuentra en el algodón, el yute, el lino, el ramio, el sisal y el cáñamo. Por otro lado, las fibras animales están formadas mayormente por proteínas, ejemplos de estas son la seda, la lana, la angora, el mohair y la alpaca. Finalmente, las fibras minerales son aquellas que provienen de minerales o que han sido ligeramente modificadas a partir de ellos.

Las fibras poseen diversas propiedades que varían según su origen y estructura, lo que otorga características funcionales particulares, como resistencia a la tracción, elasticidad, capacidad de absorción de humedad, biodegradabilidad y durabilidad (Chandramohan & Marimuthu, 2011; Mahmud et al., 2021; Sydow & Bieńczyk, 2019).

5.3.3 Polisuccinimida

La polisuccinamida, también llamada polianhidroaspartico o poliaspartimida, es un polímero biodegradable, no tóxico e insoluble en agua, aunque soluble en disolventes apróticos. Este material puede usarse como sustituto de productos derivados del petróleo y, además, como matriz polimérica para materiales naturales

reforzantes, con el fin de mitigar los problemas ambientales que enfrentan las industrias en la actualidad (Silva, 2020).

El poliácido aspártico es un poliaminoácido formado por unidades de aminoácidos unidas por enlaces amida. Se trata de un polímero lineal y flexible que contiene grupos carboxílicos hidrofílicos, lo que le otorga propiedades hidrosolubles. El ácido L-aspártico, un aminoácido no esencial, puede ser producido tanto por síntesis química como biológica. Entre los polímeros derivados de este ácido se encuentran las poliaspartamidas, micelas poliméricas, hidrogeles de poliácido aspártico y las reticulaciones solubles de poliácido aspártico (Hernández Pérez, 2021).

5.3.4 Agentes plastificantes

Los agentes plastificantes tienen como objetivo principal aumentar la flexibilidad y mejorar la procesabilidad de los polímeros, disminuyendo su temperatura de transición. Estos plastificantes son compuestos de bajo peso molecular (PM), ya sean resinas o líquidos, que interactúan mediante enlaces secundarios con las cadenas poliméricas, separándolas. De este modo, los plastificantes reducen las fuerzas de atracción entre las cadenas de polímeros, lo que facilita una mayor movilidad de las macromoléculas y da como resultado un material más blando y fácil de moldear (Rahman & Brazel, 2004).

El glicerol triol, obtenido a partir de la saponificación de grasas o como resultado intermedio de la fermentación alcohólica, se ha convertido en uno de los plastificantes más utilizados en la industria de polímeros. Esto se debe a su alta eficiencia plástica, amplia disponibilidad y bajo costo. Por otro lado, el sorbitol, debido a su estructura, tiene una excelente capacidad para interactuar con las moléculas de almidón, lo que disminuye la movilidad de las cadenas, formando una matriz de películas y reduciendo, a su vez, su interacción con el agua (Amaya Pinos, 2021).

5.4 Prospectiva de los empaques biodegradables

5.4.1 Impacto ambiental

Los empaques biodegradables, fabricados a menudo a partir de recursos renovables, se presentan como una alternativa más ecológica frente a los plásticos convencionales. Estos empaques tienen la ventaja de descomponerse de manera natural en el suelo, gracias a la acción de organismos biológicos, liberando subproductos orgánicos como CO₂ y H₂O, que son seguros para el medio ambiente una vez que han cumplido su función. Esto contribuye a reducir la acumulación de residuos y minimizar su impacto ambiental.

El uso de plásticos convencionales para empaques genera diversos problemas medioambientales, lo que hace urgente la búsqueda de soluciones más sostenibles. En este contexto, los empaques biodegradables se presentan como una alternativa ambientalmente más aceptable, cuyo principal objetivo es promover la sostenibilidad.

Los materiales biodegradables desempeñan un papel clave en la reducción de residuos sólidos, ya que se descomponen de manera más rápida y segura que los plásticos tradicionales. Esto ayuda a disminuir la acumulación de desechos en vertederos y a reducir la contaminación de ecosistemas marinos y terrestres. Además, la producción y uso de bioplásticos como el PLA y el PHA contribuyen a reducir la dependencia de recursos fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero.

Este enfoque no solo favorece la gestión de residuos, sino que también impulsa una transición hacia un modelo de economía más circular y sostenible (Castillo Juárez & Hernández Montiel, 2024; Posada & Montes-Florez, 2021).

5.4.2 Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas de los empaques biodegradables incluyen la resistencia a la tracción, la rigidez, la elasticidad y la resistencia al impacto. Estas propiedades varían dependiendo de la composición del material y de los procesos

de fabricación. Los empaques biodegradables son comúnmente de menor resistencia en comparación con los empaques convencionales. Sin embargo, se pueden mejorar mediante la adición de refuerzos como fibras naturales que aumentan esta resistencia o la mezcla de biopolímeros y polímeros sintéticos (Rodríguez Sepúlveda & Orrego Alzate, 2016; Torró & Greus, 2010).

5.4.2.1 Factores que influyen en la resistencia mecánica de los empaques

La resistencia mecánica de los empaques biodegradables depende de varios factores, como el tipo de material, el proceso de fabricación y las condiciones en las que se encuentran. Aunque, en general, los empaques biodegradables suelen ser menos resistentes que los plásticos tradicionales, se pueden mejorar con refuerzos y aditivos para lograr un buen balance entre biodegradabilidad y desempeño. Los principales factores que afectan esta resistencia son:

Composición de los materiales: Los empaques biodegradables pueden estar hechos de cosas como almidón, celulosa, PLA o incluso mezclas de varios materiales. Lo que se use influye mucho en cuánto resistencia a la tracción, rigidez y elasticidad tendrá el material.

Humedad: El agua juega un papel importante, ya que los materiales biodegradables son sensibles a la humedad. Esto puede hacer que pierdan rigidez o que se debiliten, lo que hace que no puedan soportar tanto esfuerzo (López et al., 2023).

Temperatura: Las condiciones térmicas también tienen un impacto sobre la resistencia mecánica. La exposición a temperaturas altas o bajas puede afectar la estructura molecular de los materiales, modificando su flexibilidad y resistencia al impacto (Oropeza González et al., 2016).

Aditivos y refuerzos: Para mejorar las propiedades mecánicas, se pueden añadir refuerzos como fibras naturales aditivos sintéticos que aumentan la resistencia a la tracción y la rigidez. Sin embargo, algunos aditivos pueden afectar la

biodegradabilidad del material (Rodríguez Sepúlveda L.J & Orrego Alzate C.E., 2016).

Procesos de fabricación: La forma en que se procesan los materiales, como el moldeo, extrusión o termoformado, influye en la estructura interna y las propiedades mecánicas del empaque biodegradable. Técnicas adecuadas de fabricación pueden mejorar la resistencia y durabilidad del material.

Tiempo de biodegradación: Los empaques biodegradables están diseñados para descomponerse con el tiempo. Durante este proceso, su resistencia mecánica disminuye, lo cual es un factor importante a considerar en la elección del material para la elaboración del empaque.

5.4.3 Biocompositos

Un biocomposito está formado por dos o más biomateriales, y puede incluir fibras naturales, polímeros sintéticos o polímeros biodegradables. Estos materiales, también conocidos como biopolímeros o materiales biodegradables, se caracterizan por la unión molecular de un material reforzante con otras sustancias. Este proceso de entrecruzamiento hace que el material resultante se comporte como una unidad con propiedades físico-químicas mejoradas. La característica principal de los biocompositos es su composición, que incluye elementos orgánicos con el propósito fundamental de asegurar la biodegradabilidad.

La industria biomédica es la principal demandante de estos materiales, que también se conocen como materiales bioartificiales, biosintéticos o plásticos híbridos. Además, en la industria alimentaria se utilizan para reforzar los empaques y las películas que envuelven los alimentos, mejorando así su estructura física y mecánica (Rodríguez Sepúlveda L.J & Orrego Alzate C.E., 2016; Torró & Greus, 2010).

5.5 Formas de elaboración

Los empaques alimentarios son esenciales para preservar la calidad, seguridad y frescura de los productos alimenticios, además de facilitar su transporte y distribución. Existen diversas técnicas de elaboración que permiten la creación de empaques eficientes y funcionales, adaptados a las necesidades de cada tipo de alimento. Entre los métodos más comunes se encuentran la extrusión, el termoconformado y el termoformado.

5.5.1 Extrusión

La extrusión es una técnica utilizada en el procesamiento de polímeros que permite fundir, bombear y moldear los materiales. Este proceso cumple varias funciones esenciales: transporta los polímeros desde la tolva hasta la matriz, funde el material, genera presión, mezcla los componentes para asegurar una homogeneización tanto termomecánica como química, y, finalmente, da forma al producto.

La extrusión es utilizada para la fabricación de películas, láminas, tubos, perfiles y otros productos. Las extrusoras principales se clasifican como de un solo tornillo o de doble tornillo, siendo las primeras ampliamente aplicadas al procesamiento general de polímeros y las segundas para la composición de diversas fibras, rellenos y mezclas de polímeros antes del moldeo final (Vlachopoulos & Strutt, 2003; Wilczyński et al., 2019)

5.5.2 Termoconformado

El proceso de termoconformado de materiales poliméricos consiste en la formación de finas láminas de polímero mediante un proceso de prensado hidráulico. Para ello, se utiliza una temperatura de fundición del material.

Primero, los pellets del material polimérico se colocan en las placas de la prensa. Luego, se calientan hasta alcanzar el estado de fusión, a través de la transferencia de calor por conducción. Una vez que el material está fundido, se aplica presión durante un tiempo determinado, permitiendo que el polímero adopte la forma de una lámina.

Antes de retirar la lámina de la prensa, se lleva a cabo un enfriamiento controlado del polímero, llevándolo a una temperatura inferior a su transición vítrea. Esto permite conservar la geometría deseada y la estructura molecular que se ha desarrollado durante la etapa de deformación en caliente.

5.5.3 Termoformado

El proceso de termoformado de materiales poliméricos consiste en calentar y posteriormente deformar en el molde una fina lámina del polímero utilizado a una temperatura superior a su temperatura de transición vítrea.

La lámina delgada, sujeta en los bordes, se calienta hasta un estado ablandado por medio de una transferencia de calor radiativa. Inmediatamente después de retirar el calentador, la lámina se deforma para adoptar la forma del molde mediante la aplicación de una presión. La presión se aplica ya sea en la cara superior de la lámina o mediante la evacuación del aire entre la lámina y el molde. Antes de retirar la presión aplicada, se lleva a cabo el paso de congelación enfriando el polímero a una temperatura por debajo de su transición vítrea para conservar la geometría deseada del producto final y su estructura molecular desarrollada durante la etapa de deformación en caliente (Makradi et al., 2007).

5.6 Caracterización fisicoquímica

La caracterización fisicoquímica de los materiales es un proceso fundamental para comprender las propiedades y el comportamiento de diversas sustancias en distintas condiciones. Esta información es crucial para determinar la idoneidad de un material en aplicaciones específicas. Además, la caracterización fisicoquímica contribuye a mejorar el diseño y rendimiento de los materiales, asegurando su calidad y seguridad en su uso. Las técnicas más utilizadas para realizar esta caracterización se mencionan a continuación.

5.6.1 FTIR

La espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) es una de las herramientas utilizada para la determinación del grupo funcional en una membrana

junto con los posibles enlaces moleculares entre compuestos químicos. Este tipo de análisis se puede utilizar para caracterizar muestras en forma de líquidos, soluciones, pastas, polvos, películas, fibras y gases. El espectro puede generar datos de “absorción versus número de onda” o de “transmisión versus número de onda. Los espectros FTIR muestran picos de absorción que corresponden a las vibraciones características de los enlaces químicos en las moléculas. Estos picos se encuentran en rangos específicos y, al compararlos con bases de datos o tablas, se pueden identificar los grupos funcionales presentes en la muestra como OH, NH, CH, CO, etc. (Mohamed et al., 2017; Nandiyanto et al., 2019).

5.6.2 Propiedades mecánicas

La resistencia mecánica de los materiales de envasado de alimentos es un factor clave para evaluar su capacidad de soportar las tensiones y los esfuerzos causados por los factores ambientales y los productos envasados. Para medir las propiedades mecánicas de estos materiales, se utilizan diversos parámetros, tales como la resistencia a la tracción, tenacidad, elasticidad, fragilidad, rigidez, suavidad, adhesividad, dureza y fuerza de ruptura, entre otros (Y. A. Shah et al., 2023). Algunos de los equipos más comúnmente empleados para evaluar estas propiedades mecánicas incluyen:

Instron Universal Testing Machines: Estas máquinas son ampliamente utilizadas para realizar pruebas de tracción, compresión, flexión y otros tipos de esfuerzos mecánicos.

Tensile Testing Machines: Se emplean para evaluar la resistencia al impacto, perforación o corte, y cuentan con accesorios específicos para realizar pruebas de punción.

VI. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Obtención de los materiales base

6.1.1 Polisuccinimida (PSI)

La polisuccinimida es obtenida del ácido L-aspártico mediante la técnica de policondensación térmica de acuerdo con la metodología que establece Neri (Bennett, 2005)

1. Se pesan 100 gr de ácido L-aspártico y se agrega a un vaso de precipitado de 500ml.
2. El vaso de precipitado se coloca en una parrilla de calentamiento a una temperatura de 250 a 300 °C, se mantiene a esa temperatura con movimientos constantes hasta que sufra un cambio de color de blanco a rosa coral.
3. Posteriormente se retira el vaso de precipitado y se deja enfriar a temperatura ambiente.
4. Se realizan una solución de HCl al 1%, una solución de NaHCO₃ saturada.
5. Se procede a realizar los filtrados para ello se pesan 3gr de muestra la cual es colocada en embudos con papel filtro.
6. Se realiza el primer lavado agregando 5mL de la solución de HCl, posteriormente se agregan 5ml de agua destilada.
7. Una vez realizado lo anterior se procede a realizar un lavado con la solución de NaHCO₃ saturado agregando 15mL a la muestra, finalmente se realiza un último lavado con 5mL de agua destilada.
8. Terminados los lavados se seca en un horno de secado durante al menos 24h a 40°C.

6.1.2 Microcelulosa (MC)

Etapa 1: Obtención de la microcelulosa

Para la obtención de la microcelulosa se utilizaron fibras de *Agave de Lechuguilla*. La cual es cortada para reducir su tamaño y facilitar su manipulación durante los tratamientos y molienda.

Una vez cortadas las fibras se someten a un acondicionamiento de secado una temperatura de 60°C por 6 h para eliminar la humedad residual.

Una vez que las fibras son acondicionadas se procede a un primer tratamiento con ácido sulfúrico al 98%, adicionando 20mL por cada gr de fibra, manteniéndose en agitación constante durante una hora a una temperatura de 20-23°C. Transcurrido el tiempo se deja sedimentar para retirar el sobrante y proseguir con una serie de lavado con agua destilada hasta llegar a un pH neutro. Este tratamiento se realiza con la finalidad de romper la pared celular y eliminar impurezas de la fibra.

Después de obtener un pH neutro se procede a realizar un proceso de cloración utilizando NaClO al 3.5%, adicionando 20 mL de la solución por cada gr de muestra, manteniéndose en agitación constante por una hora a una temperatura de 30°C. Cumplido el tiempo se retira el sobrante y se realiza nuevamente una serie de lavados hasta obtener pH neutro. Este paso se lleva a cabo con el fin de eliminar lignina presente, así como colorantes naturales.

Posteriormente se procede a realizar una hidrolisis alcalina con NaOH al 5%, adicionando 20mL de solución por cada gr de muestra, manteniéndose en agitación constante durante 2 h a una temperatura de 60°C. Transcurrido el tiempo se procede a retirar el sobrante y realizar una serie de lavados hasta obtener un pH neutro. Este proceso tiene como objetivo eliminar hemicelulosa, azúcares y oxidantes presentes en las fibras.

Concluido el paso anterior se procede a realizar una última cloración con NaClO al 0.5%, manteniéndose en agitación constante por una hora. Finalmente se procede a realizar los respectivos lavados hasta llegar a un pH neutro.

Después de realizar los tratamientos se procede a secar la fibra en un horno a una temperatura de 60°C por 24 h (Isidro, 2019).

Posterior a los tratamientos se realizó la molienda de la lechuguilla previamente cortada y tratada, para ello se utilizó un molino de aspas “El crisol” y un molino de bolas para después tamizar a través de una criba de malla número 150 con abertura de 105 micrones (0.0105 cm).

Etapas 2: Establecimiento de las condiciones de acetilación

Una vez obtenida la microcelulosa se procedió a realizar los procesos de acetilación a diferentes tiempos 3 y 5 horas.

Este proceso consiste en colocar 18 g de microcelulosa anteriormente tamizada en un matraz bola, añadiendo 400 mL de ácido acético y 4.23 g de ácido tartárico como un catalizador de la reacción. Para llevar a cabo esta reacción el matraz es colocado aun condensador de flujo con refrigerante y a una parrilla de calentamiento con agitación magnética a una temperatura de 120°C (ebullición). El método de condensador de flujo permite recuperar el agente que se volatiliza por la ebullición, haciéndolo recircular.

Cumplido el tiempo establecido en la acetilación, el matraz se retira y se vacía la solución en embudos con papel filtro, se procede a realizar una serie de lavados con agua destilada hasta alcanzar un pH neutro. Finalmente se procede a secar las muestras por 24 h a una temperatura de 60°C.

6.1.3 Almidón

Para la obtención del almidón se utilizó fécula de maíz, con el cual se realizó siguiendo la metodología de (Xu et al., 2004) con algunas modificaciones, por un tiempo de terminado de 5 h.

Se mezcló almidón en su forma seca con anhídrido acético en una proporción de 1:4, agitando durante 5 minutos. Posteriormente, se añadió 0.15 g de una solución al 50% de hidróxido de sodio por cada gramo de almidón y se calentó a 120 ± 5 °C durante 5 horas. Transcurrido el tiempo se realizó un lavado en dos etapas con agua destilada y en dos etapas más con alcohol etílico al 96%, intercalando ambos tipos de lavado. Finalmente, el material se secó a 50 °C durante 24 horas y finalmente se molió y tamizó utilizando un tamiz de malla número 100.

6.2 Elaboración de probetas

En la elaboración de probetas se realizaron utilizando los materiales base obtenidos. Los procesos para su elaboración se llevaron a cabo en planta piloto 1 del Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA).

6.2.1 Preparación de la formulación

Para realizar las probetas se formularon 6 mezclas diferentes utilizando los materiales base, MC nativa y acetilada a 3 y 5 horas, ST nativo y acetilado, PSI, GL como agente plastificante, AEO. La proporción de los materiales empleados para las probetas se muestran en la table 1 que se presenta a continuación.

Tabla 1 Formulaciones de las probetas realizadas

Mezclas						
Materiales	MA	MB	MC	MD	ME	MF
PSI	22	22	22	22	22	22
Almidón	22 (0 h)	22(5 h)	22(0 h)	22(5 h)	22(0 h)	22(5 h)
MC	22(0 h)	22(0 h)	22(3 h)	22(3 h)	22(5 h)	22(5 h)
Glicerol	30.5	30.5	30.5	30.5	30.5	30.5
AEO	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5

6.2.2 Extrusión

La extrusión de los materiales para las probetas se realizó en el equipo Extruder micro compounder Xplore IM 15, que se encuentra en planta piloto 1 del Centro de Investigación de Química Aplicada, la cual se realizó bajo las condiciones que se muestran en la tabla 2.

Tabla 2 Condiciones de extrusión

Parámetros empleados
Temperatura: 100°C
Velocidad de husillo: 60 rpm
Tiempo de resistencia: 5 min

Los materiales fueron pesados por separado, posteriormente se mezclaron iniciando con los líquidos glicerol y AEO, para continuar con el ST, MC y PSI. Después de mezclar los materiales y obtener una mezcla homogénea, se alimentó

en la tolva del Extruder para iniciar con el proceso de extrusión y finalmente obtener los filamentos homogenizados.

6.2.3 Termoconformado

Obtenidos los filamentos se procedió a realizar las pruebas del proceso de termoconformado el cual se llevó a cabo en planta piloto 1 del Centro de Investigación en Química Aplicada, el proceso se llevó a cabo empleando el moldeado por compresión para ello se utilizó una termoconformadora marca PHI. Utilizando los parámetros que se muestran en la tabla 3.

Tabla 3 Condiciones de termoconformado

	Presión	Temperatura	Carga	Tiempo
Prueba 1	25 ton	100 °C	110 gr	5 min
Prueba 2	25 ton	110 °C	115 gr	5 min
Prueba 3	25 ton	120 °C	120 gr	5 min
Prueba 4	25 ton	130 °C	120 gr	5 min
Prueba 5	25 ton	140 °C	120 gr	5 min
Prueba 6	25 ton	150 °C	120 gr	5 min
Prueba 7	25 ton	160 °C	120 gr	5 min
Prueba 8	25 ton	170°C	125 gr	5 min
Prueba 9	25 ton	180 °C	125	5 min

El proceso de termoconformado comenzó con el corte de los filamentos para obtener los pellets, que luego fueron colocados en las placas de la prensa, las cuales habían sido previamente calentadas. Durante este proceso, se realizaron diversas pruebas para determinar las condiciones óptimas para la termoconformación del material. Se probaron diferentes temperaturas, incrementándolas en intervalos constantes de 10 °C hasta alcanzar el punto de fusión del material. Además, se aumentó la cantidad de material hasta cubrir completamente la placa. La presión aplicada fue constante a 25 toneladas, y el tiempo de conformado fue de 5 minutos. Al finalizar este tiempo, el material pasó a una placa de enfriamiento, donde circuló agua a una presión de 25 toneladas durante 5 minutos.

6.2.4 Termoformado

Una vez obtenidas las probetas se precedió a realizar las pruebas de termoformado utilizando el equipo Termo-Formado Sencorp Systems el cual se encuentra en planta piloto 1 del Centro de Investigación en Química Aplicada. Utilizando los parámetros que se mencionan en la tabla 4.

Tabla 4 Condiciones de termoformado

Placa	Tiempo	Temperatura
Mezcla A	205 °C	120 seg
Mezcla B	220 °C	198 seg
Mezcla C	230 °C	120 seg
Mezcla D	240 °C	120 seg
Mezcla F	240 °C	120 seg

Para las pruebas de termoformado se realizaron diferentes pruebas para establecer las condiciones adecuadas para la formación de los envases para ellos se manejaron diferentes condiciones de temperatura y tiempo para el calentamiento de las diferentes láminas de polímero, obtenidas en el proceso de termoconformado, esto para lograr el reblandecimiento del material, para posteriormente pasar de formarse mediante proceso de vacío de acuerdo con el molde utilizado.

6.3 Caracterización fisicoquímica de los materiales base y envases generados

La caracterización de los materiales base, probetas y envases generados se llevó a cabo en los laboratorios de caracterización del Departamento de Ciencia y Tecnología de Alimentos y en el Centro de Investigación en Química Aplicada.

6.3.1 Grados de sustitución de la MC y ST acetilados

Los grados de sustitución de la MC acetilada y del ST acetilado se analizaron siguiendo la metodología de (Sodhi & Singh, 2005) con algunas modificaciones. Se tomo 1 g de muestra de los productos acetilados y se mezcló con 50 ml de etanol al 75%, posteriormente se llevó a calentar a 50°C por 30 min en baño maría. Transcurrido el tiempo, se dejó enfriar a temperatura ambiente y se agregaron 40 mL de NaOH 0.5 N. El exceso de álcali se valoró con HCl 0.5 N, utilizando fenolftaleína como indicador. Se dejó reposar la solución valorada durante al menos 30 minutos. Al finalizar este tiempo, se realizó una segunda valoración para considerar la lixiviación por exceso de cualquier álcali. Para la muestra de blanco se utilizaron MC y ST sin acetilar tratadas de la misma forma que las muestras acetiladas. El porcentaje de acetilo y los grados de sustitución se calcularon con las siguientes formulas:

$$\%acetilo = \frac{(V_{blanco} - V_{muestra}) * N * 0.043}{g} * 100$$

$$GS = \frac{162 * \%acetilo}{4300 - (42 * \%acetilo)}$$

Donde:

Vblanco = volumen de HCl gastados en la titulación del blanco.

Vmuestra = volumen gastado de HCl gastados en la titulación de la muestra.

N = normalidad del HCl.

0.043 = miliequivalente del grupo acetilo.

162 = peso molecular de la anhiroglucosa.

4300 = peso molecular del grupo acetilo multiplicado por 100.

42 = peso molecular del grupo acetilo menos 1.

6.3.2 Espectroscopía infrarroja por transformadas de Fourier (FTIR)

Se realizó la determinación química de las materias primas, de las probetas obtenidas y de los envases generados mediante espectroscopia infrarroja por transformadas de Fourier con un equipo PerkinElmer UATR Two del laboratorio de caracterización de la UAAAN.

6.3.3 Propiedades mecánicas

Las pruebas mecánicas se determinaron una vez obtenidas las probetas y los envases. En probetas fraccionadas a un tamaño uniforme (7 * 1 cm). El equipo empleado para estas mediciones fue un texturómetro Brookfield modelo C3 acoplado la sonda correspondiente para la medición a realizar como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5 Parámetros de pruebas mecánicas

SONDA	PARAMETRO	OBJETIVO	CARGA DE ACTIVACION	VELOCIDAD DE TEST	CORRECCION
TA-DGA	TENSION % ELONGACION MODULOELASTICO	50%	6.8 g	0.50 mm/s	0 g

VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Establecimiento de condiciones de termoconformado y termoformado

La presente etapa tuvo como objetivo establecer las condiciones para realizar el proceso de termoconformado y termoformado.

7.1.1 Condiciones de termoconformado

Para el establecimiento de las condiciones apropiadas se llevaron a cabo una serie de pruebas en las cuales se utilizaron diferentes temperaturas, incrementándose en intervalos de 10 °C hasta alcanzar el punto de fusión del material. Así como también el establecimiento del tiempo y la carga adecuada para la elaboración de las láminas. La tabla 6 muestra las condiciones de termoconformado que fueron establecidas.

Tabla 6 Condiciones de termoconformado establecidas

Parámetros	
Temperatura	180 °C
Tiempo	5 min
Carga	125 gr
Presión	25 ton

Durante este proceso, fueron elaboradas las láminas de las diferentes mezclas previamente mencionadas. En su mayoría, las láminas obtenidas estuvieron en condiciones óptimas para su posterior análisis y termoformado, las cuales cuentan con dimensiones de 30 X 30 cm por lado y un espesor de 0.5000 mm.

Durante esta etapa las placas elaboradas a partir de la mezcla E mostraron pequeñas grietas en la parte central, mismas que no cumplen con los requisitos adecuados para el proceso de termoformado, debido a que las grietas presentes en

la zona central impiden la realización del vacío, lo que ocasionaría la ruptura de las láminas durante el termoformado.

7.1.2 Condiciones de termoformado

Para el establecimiento de las condiciones de termoformado se utilizaron diferentes temperatura y tiempo de calentamiento para el reblandecimiento de la lámina para pasar al formado por vacío y tomar la forma del molde. La tabla 7 presenta los parámetros que se establecieron para llevar a cabo el proceso de manera satisfactoria

Tabla 7 Condiciones de termoformado establecidas

Parámetros	
Temperatura	240 °C
Tiempo	120 seg

Las láminas obtenidas bajo las condiciones requeridas durante el proceso de termoconformado fueron sometidas a un nuevo proceso de termoformado, en el cual, mediante la aplicación de vacío, las láminas se deformarían hasta adoptar la forma del molde. Sin embargo, a pesar de realizar diversas pruebas y de aumentar la temperatura entre una prueba y otra, no fue posible conformarlas completamente, ya que el material no presentó la suficiente fluidez para lograr un formado total.

Se sugiere para futuras investigaciones, realizar un ensayo de índice de fluidez (ensayo que se realiza en un plastómero), mismo que está directamente relacionado con la procesabilidad de un material y que puede dar información para implementar acciones para solventar esta situación en la cual pueden estar involucrados factores como el peso molecular del polímero o bien añadiendo cargas o lubricantes externos (Lerma, 2017).

7.2 Caracterización química de los materiales base

Los materiales base se caracterizaron de acuerdo con sus propiedades químicas mediante Espectroscopia Infrarroja por Transformadas de Fourier, así mismo, una vez realizado el proceso de termoconformado y termoformado se analizaron las

probetas elaboradas por el mismo método para la determinación química. La figura 1 presenta el espectro IR correspondiente a la PSI.

7.2.1 FTIR de la PSI

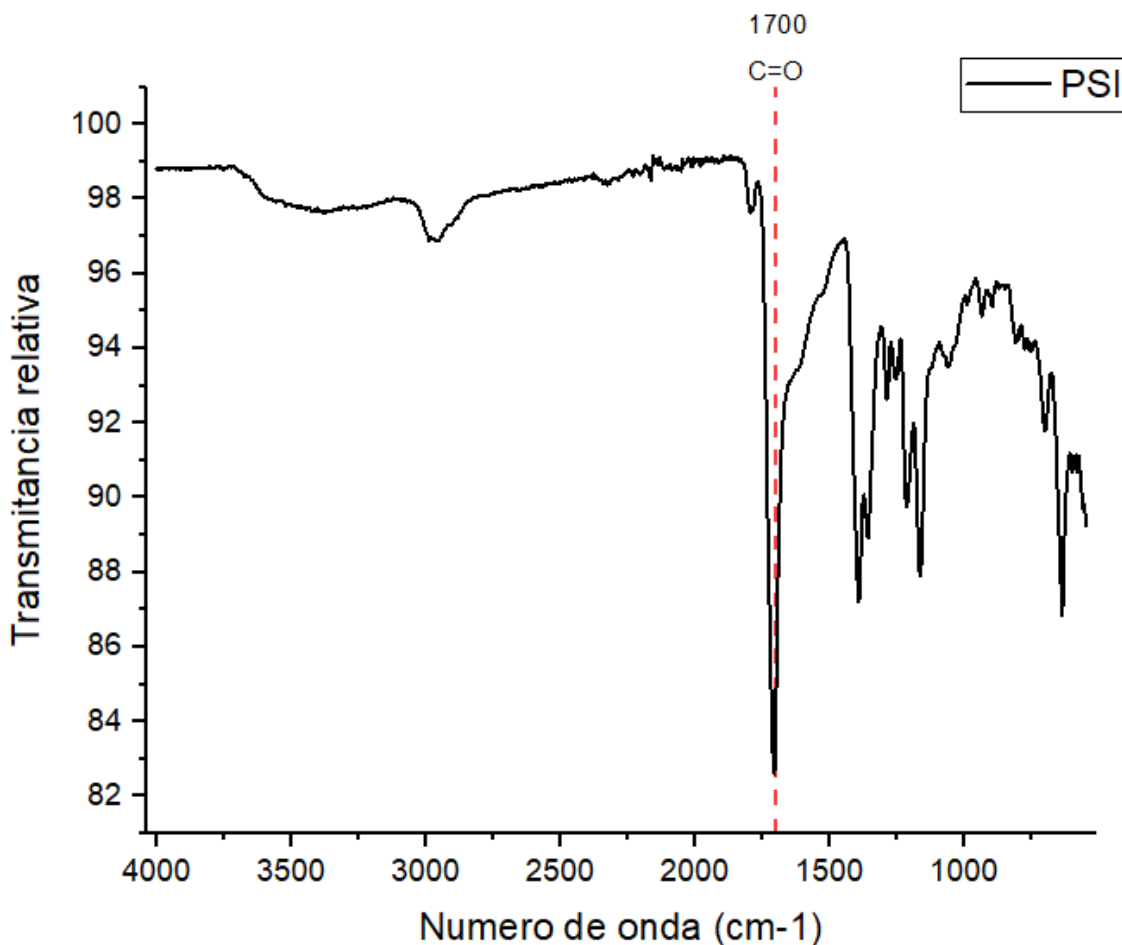


Figura 1 Espectroscopia de Infrarrojo por Transformadas de Fourier (FTIR) de la PSI

De acuerdo con el análisis de FTIR realizado a la polisuccinimida, se muestra una banda donde se hace presente una banda pronunciada a los 1700 cm^{-1} , se atribuye a la presencia del grupo carbonilo característica de la reacción de polimerización del ácido aspártico dando la formación del anillo de la succinimida.

De acuerdo con lo reportado con la literatura (Silva, 2020) las bandas de absorción se encuentran en 1708 cm^{-1} y 1797 cm^{-1} que corresponde a los grupos carbonilo C=O, correspondientes al alargamiento simétrico y asimétrico del anillo succinimida.

7.2.2 FTIR de la MC

La MC, utilizada en el presente proyecto se obtuvo a través de una modificación química por esterificación, la cual consiste en la sustitución de los grupos carboxilos por grupos acetilos brindando mayor estabilidad, así variando en sus propiedades fisicoquímicas y funcionales. La cual se expuso a dos diferentes tratamientos; 3 horas y 5 horas. Caracterizada mediante Espectroscopia infrarroja por transformadas de Fourier (FTIR); en la figura 2, se muestra el Espectro IR de cada acetilación, así como también, el análisis correspondiente a la MC en estado nativo.

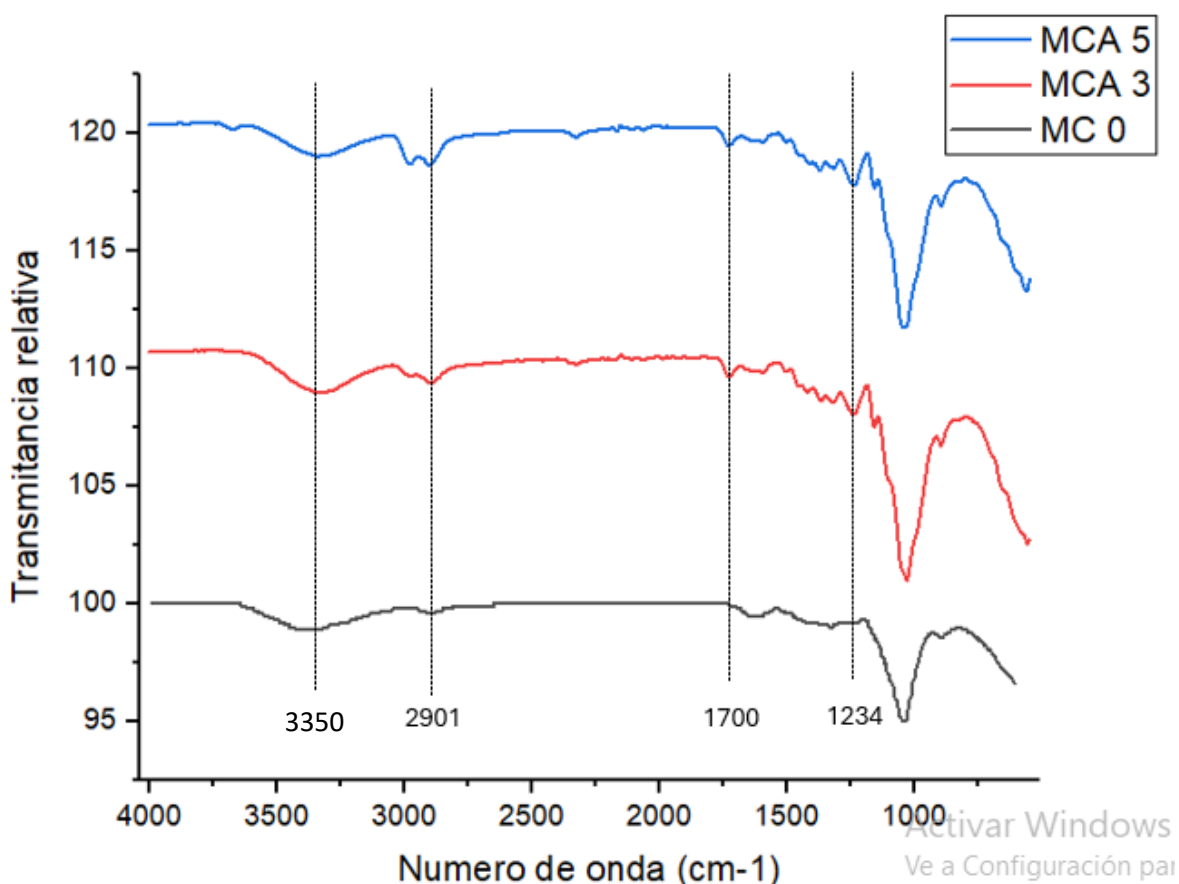


Figura 2 Espectroscopia de Infrarrojo por Transformadas de Fourier (FTIR) de muestras de microcelulosa nativa y acetiladas. MC 0, microcelulosa sin acetilar; MCA 3, microcelulosa acetilada por 3 h; MCA 5, microcelulosa acetilada por 5 h.

En la figura 2 se presentan los espectros de infrarrojo de la MC nativa y acetilada a diferentes tiempos de reacción. En estos espectros, se observan varias bandas que corresponden a los tratamientos aplicados a la MC. Entre los 3700-3000 cm^{-1} , se encuentra una banda asociada a los grupos hidroxilo (O-H), que pertenecen a la

estructura original de la MC. Mientras tanto, alrededor de los 1700-1730 cm^{-1} se observa una banda relacionada con el estiramiento de los grupos acetato ($\text{C}=\text{O}$), como lo indican (Foresti VER et al., 2014). A medida que aumenta el tiempo de acetilación, la intensidad de esta banda también incrementa, lo que sugiere que el tiempo de exposición durante la reacción es un factor clave para obtener MC con un mayor grado de sustitución. Además, la banda en 2901 cm^{-1} corresponde a la vibración de los grupos CH_2 presentes en la celulosa. También se puede identificar una banda alrededor de los 1234 cm^{-1} , atribuida al estiramiento del grupo acetilo (CO), la cual no se observa en la muestra sin acetilar, tal como se menciona en el estudio de (Ashori et al., 2014), lo cual demuestra la efectividad del proceso de acetilación.

7.2.3 FTIR del almidón

El almidón, utilizado en el presente proyecto se expuso a dos diferentes tratamientos; 0 horas y 5 horas de acetilación. Caracterizada mediante FTIR. La figura 3 presenta su espectro.

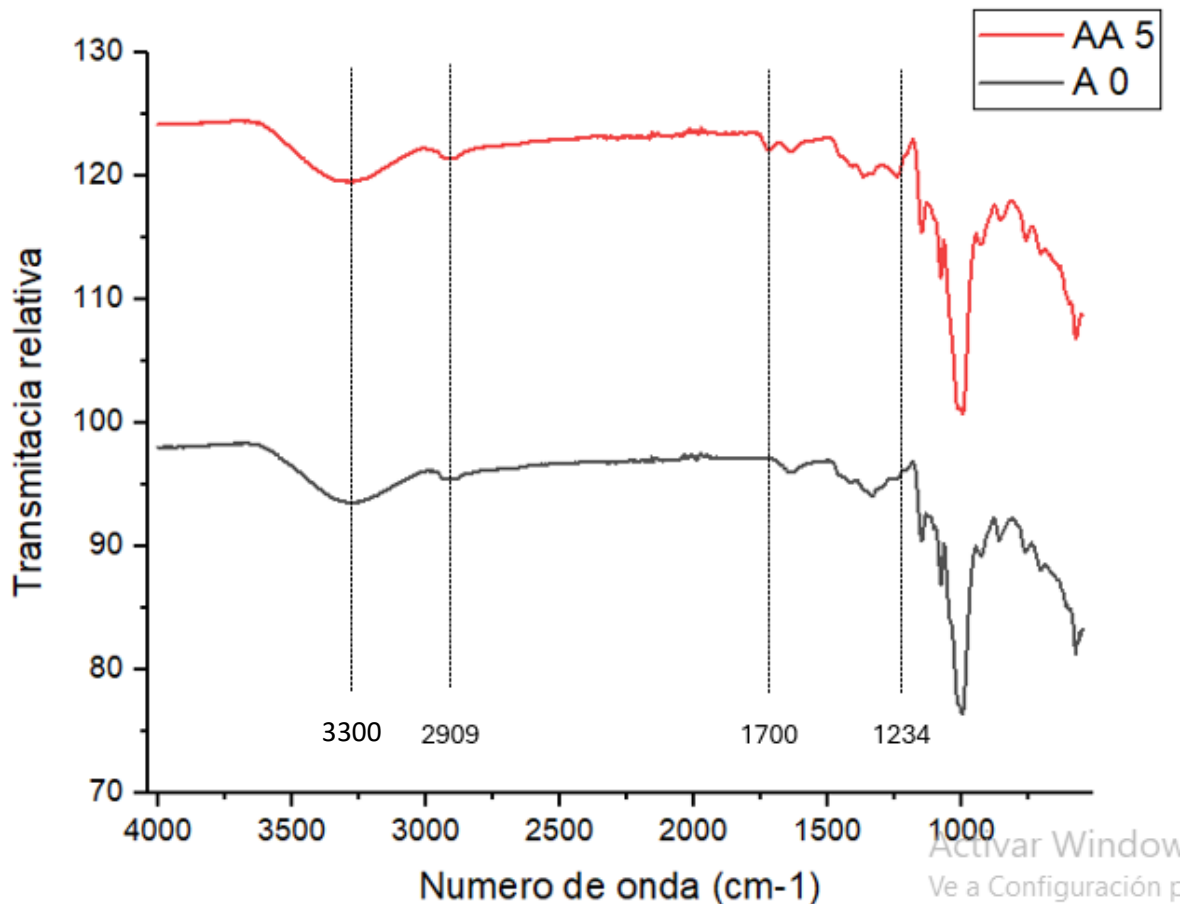


Figura 3 Espectroscopia de Infrarrojo por Transformadas de Fourier (FTIR) de muestras de almidón de maíz nativo y acetilados. A 0, almidón sin acetilar; AA 5, almidón acetilado por 5 h

El espectro FTIR realizado al almidón, presenta una banda entre los 3000 y 3300 cm^{-1} que corresponde a los grupos OH presentes tanto en el almidón nativo como en el acetilado. A medida que aumenta el tiempo de acetilación, esta banda tiende a disminuir, lo que sugiere una sustitución parcial de los grupos OH (Ávila Ramírez et al., 2016). Por otro lado, la banda alrededor de 2909 cm^{-1} está relacionada con la vibración del grupo CH₂ (A. Shah et al., 2017). La banda más representativa del almidón acetilado se encuentra aproximadamente a 1700 cm^{-1} , y está asociada con el estiramiento de los grupos carbonilo (C=O). Este grupo funcional forma parte de los grupos acetilo, lo que indica que el proceso de acetilación se llevó a cabo correctamente. Finalmente, la banda que se encuentra alrededor de los 1234 cm^{-1} corresponde al estiramiento del enlace CO y su intensidad aumentó con el tiempo

de reacción, lo que confirma que los tiempos de acetilación influyen en los grados de esterificación de los almidones (Olagunju et al., 2020).

7.2.4 FTIR de probetas termoconformadas

Una vez obtenidas las láminas del proceso de termoconformado se procedió a realizar las probetas las cuales fueron caracterizadas mediante FTIR de cada una de las probetas, la figura 4 muestra los Espectros IR obtenidos de cada una de las mezclas.

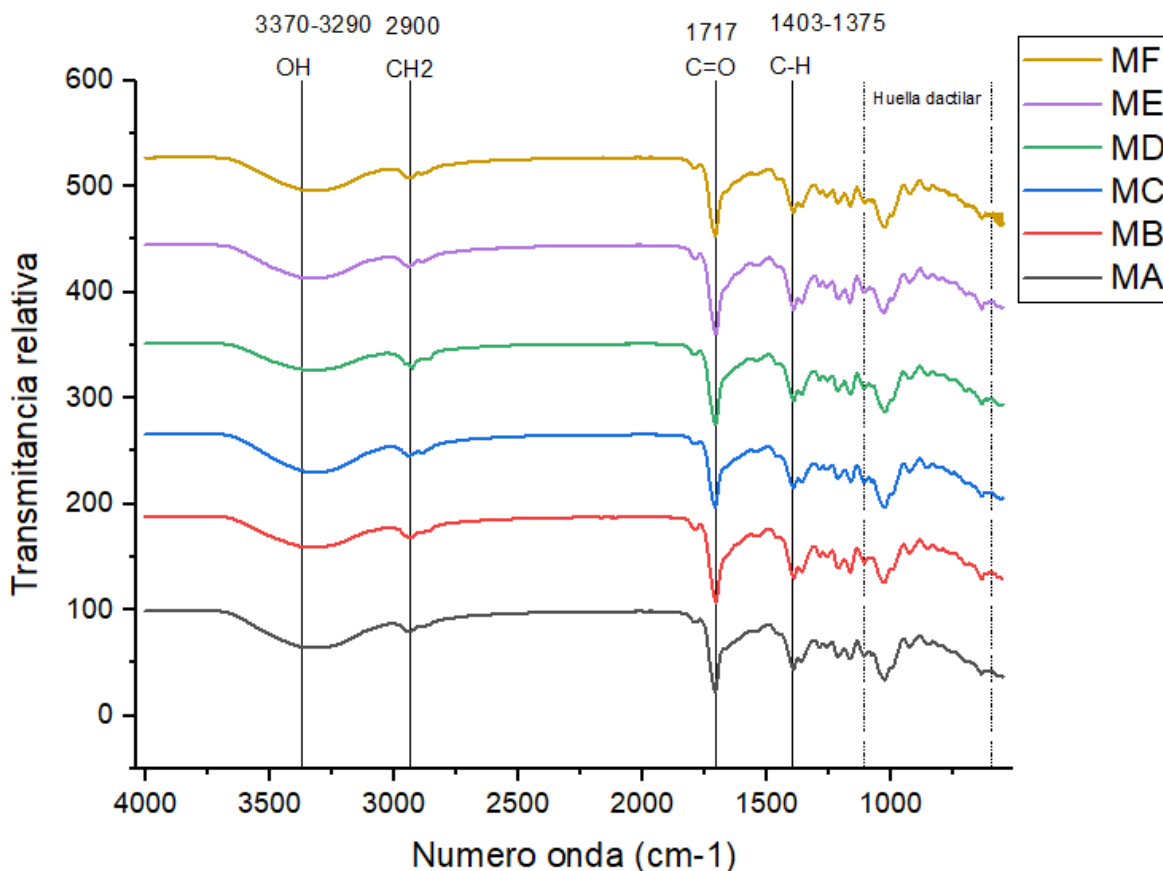


Figura 4 Espectroscopia de Infrarrojo con Transformadas de Fourier (FTIR) de las probetas termoconformadas. MA, probeta con materiales sin acetilar; MB, probeta con microcelulosa 0 h y almidón acetilado por 5 h; MC, probeta con microcelulosa acetilada por 3 h y almidón por 5 h; ME, probeta con microcelulosa por 5 h y almidón 0 h; MF, probeta con microcelulosa acetilada 5 h y almidón 5 h

La banda que se encuentra alrededor de los 3300 cm^{-1} corresponde a los grupos hidroxilo (OH) y a medida que aumenta los tiempos de acetilación, la banda va disminuyendo de intensidad. La intensidad de la banda de los grupos OH es

atribuida al glicerol, la intensidad de la banda disminuye debido al proceso de acetilación de la microcelulosa y almidón. Enseguida se presentan las bandas de 2900 cm^{-1} que corresponden a la interacción CH_2 presentes en la microcelulosa (Ashori et al., 2014). La banda que se encuentra en los 1700 cm^{-1} corresponde a los grupos carbonilo ($\text{C}=\text{O}$) presente en la polisuccinimida y en el almidón y microcelulosa acetilados (Dewi et al., 2019; Lin et al., 2019). La banda que se encuentra en intervalos de $1403\text{-}1375\text{ cm}^{-1}$ corresponde al estiramiento de los grupos carbono e hidrogeno, finalmente la huella dactilar que hacer referencia a los carbonos presentes en el almidón y la microcelulosa. De los espectros analizados solamente se presentaron los grupos funcionales característicos de los materiales base sin presentar otro tipo de grupos que denoten degradación de los componentes empleados.

7.2.5 FTIR de probetas termoformadas

En la figura 5 se muestran los espectros de infrarrojo de los envases termoformados, donde se observan las bandas más representativas de los diferentes grupos funcionales presentes.

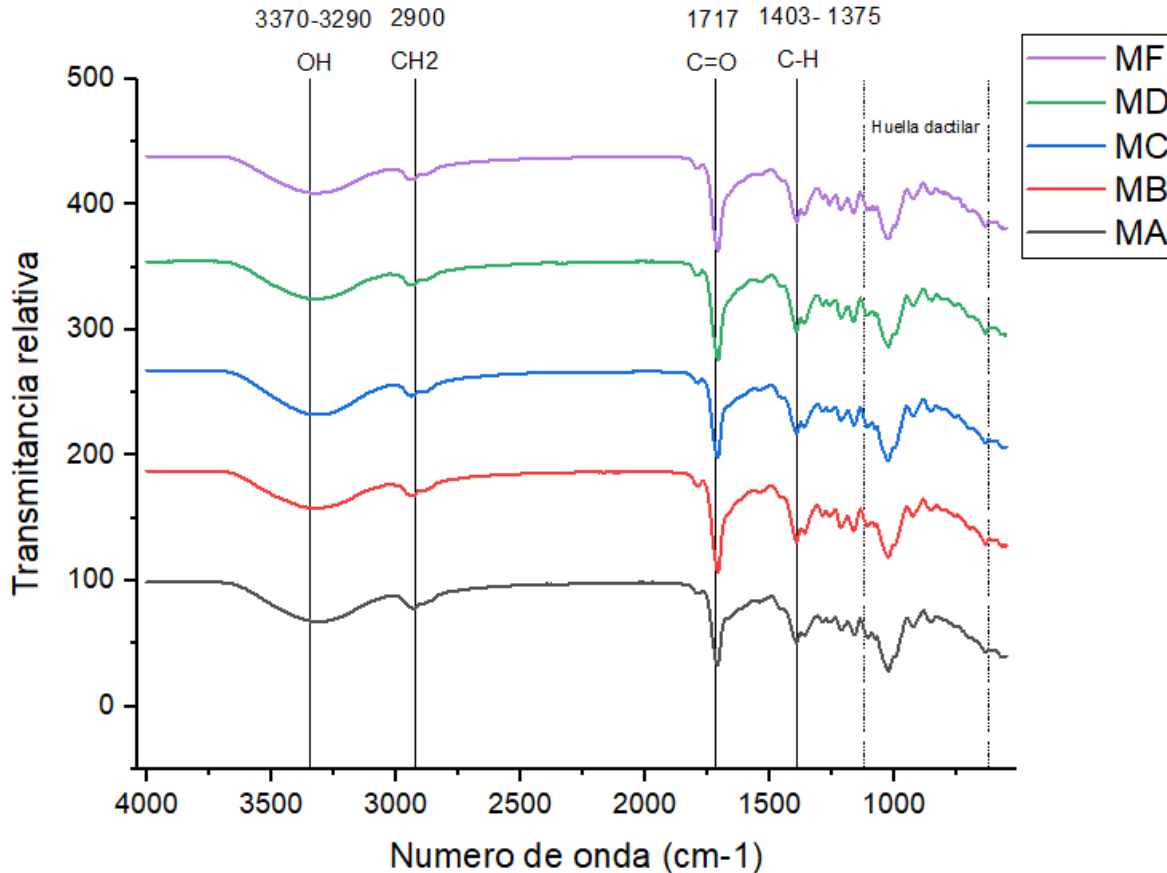


Figura 5 Espectroscopia de Infrarrojo con Transformadas de Fourier (FTIR) de las probetas termoformadas. MA, probeta con materiales sin acetilar; MB, probeta con microcelulosa 0 h y almidón acetilado por 5 h; MC, probeta con microcelulosa acetilada por 3 h y almidón 0h; Md, probeta con microcelulosa acetilada 3h y almidón 5h; mf probeta con microcelulosa acetilada por 5h y almidón 5h.

Se presentan bandas alrededor de los 3300 cm^{-1} corresponde a los grupos hidroxilo (OH) y a medida que aumenta los tiempos de acetilación, la banda va disminuyendo de intensidad. La intensidad de la banda de los grupos OH es atribuida al glicerol, la intensidad de la banda disminuye debido al proceso de acetilación de la microcelulosa y almidón. Enseguida se presentan las bandas de 2900 cm^{-1} que corresponden a la interacción CH_2 presentes en la microcelulosa. La banda que se encuentra en los 1700 cm^{-1} corresponde a los grupos carbonilo (C=O) presente en la polisuccinimida y en el almidón y microcelulosa acetilados. La banda que se encuentra en intervalos de $1403\text{-}1375\text{ cm}^{-1}$ corresponde al estiramiento de los

grupos carbono e hidrogeno, finalmente la huella dactilar que hacer referencia a los carbonos presentes en el almidón y la microcelulosa. Las bandas presentaron una mayor intensidad significativa en comparación con las probetas termoconformadas analizadas que se muestran en la figura 5, lo cual sugiere interacciones entre los materiales constitutivos de las probetas durante el proceso de termoformado.

7.2.6 Grados de sustitución y porcentaje de acetilo de la Microcelulosa acetilada

Los análisis de los grados de sustitución y porcentaje de acetilo que se les realizaron a la MC acetilada a 3 h y 5 h, se representan en las figuras 6 y 7 respectivamente.

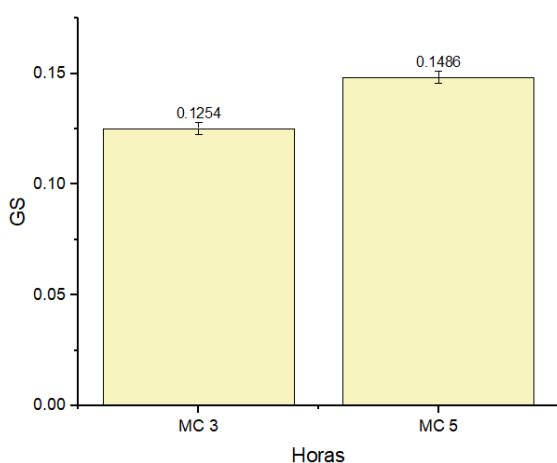


Figura 7 Grados de sustitución de microcelulosa acetilada por 3 h, microcelulosa acetilada por 5 h.

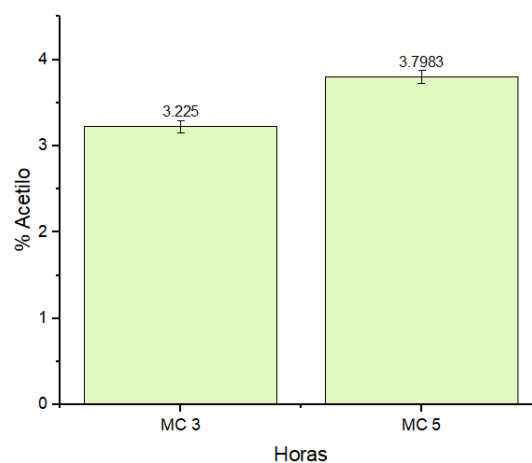


Figura 6 Porciento de acetilo de microcelulosa acetilada por 3 h, microcelulosa acetilada por 5 h

Como se puede apreciar en la figura 7 la muestra expuesta a 3 h de acetilación alcanzó un 0.1254 de grados de sustitución superada por tratada por 5 h con un valor de 0.1486 presentando diferencias estadísticamente significativas $p < 0.05$. De manera similar para el porcentaje de acetilo la MC tratada por 3 h presentó un porcentaje de 3.224 inferior al 3.7983 para la muestra de 5 h de tratamiento.

7.2.7 Grados de sustitución y porcentaje de acetilo del Almidón acetilado

Los análisis del grado de sustitución y porcentaje de acetilo que se les realizaron para el almidón acetilado a 5 h se representan en la tabla 8 continuación.

Tabla 8 Grados de sustitución y porcentaje de acetilo del Almidón acetilado a 5 h

Almidon 5h	Valor promedio
Grados de sustitucion	6.5318 ± 1.2902
Porcentaje de acetilo	63.78333 ± 4.7397

En la tabla 8 se puede observar los grados de acetilación de acuerdo con los porcentajes de acetilación y de los grados sustitución realizados a las muestras de almidón acetilado por 5 h. Teniendo que para el porcentaje de acetilo se tiene un valor promedio de 63.78333 y un valor promedio de 6.5318 para los grados de sustitución.

7.3 Evaluación de propiedades mecánicas

Las probetas obtenidas en el proceso de termoconformado y termoformado se caracterizaron mecánicamente empleando un texturómetro Brockfield C3 utilizando la sonda TA-DGA para la medición de tensión, porcentaje de elongación, modulo elástico.

7.3.1 Tensión a la ruptura

El parámetro tensión fue evaluado bajo las condiciones mencionadas en la metodología. Las medias de los datos obtenidos se presentan en el anexo 1 y la figura 8.

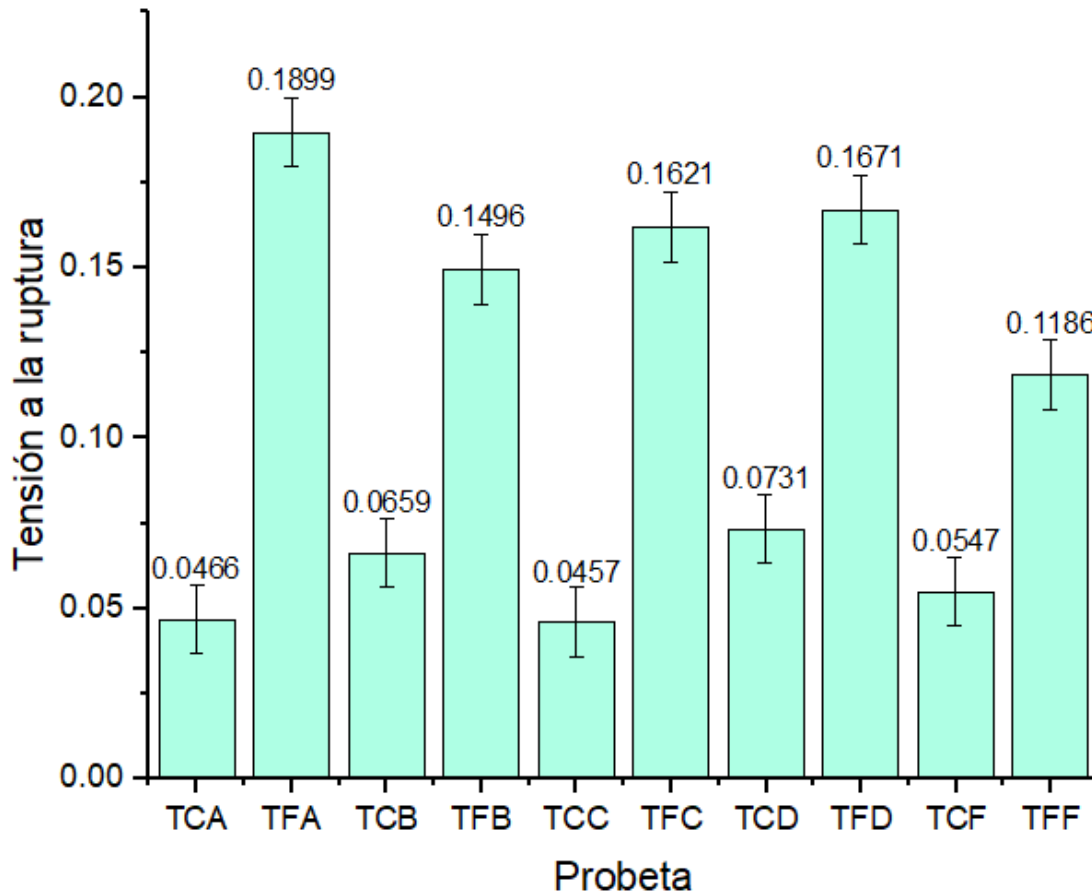


Figura 8 tensión a la ruptura

En la figura 8 se aprecian los valores obtenidos para el parámetro de tensión a la ruptura, observándose diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) entre las probetas termoconformadas con respecto a las termoformadas siendo estas últimas las que presentaron valores más elevados, con diferencias estadísticamente significativas entre ambos tratamientos.

Dicho comportamiento puede ser atribuido a que el proceso de termoformado mediante los procesos de calentamiento para lograr la maleabilidad del polímero y su posterior estiramiento, darán lugar a un mejor ordenamiento y orientación de las

moléculas lo cual aumenta la resistencia y la rigidez en dirección de la deformación, en contraste con el termoconformado donde la estructura interna es más aleatoria, lo que puede llevar a una variabilidad mayor en las propiedades mecánicas de una pieza. Adicionalmente la orientación molecular reduce la movilidad de las cadenas poliméricas, lo que hace que sea más difícil que se deslicen o se separen bajo tensión, aumentando la resistencia general (Bertoldo, 2018) (Sperling, 2006).

7.3.2 Porcentaje de elongación

El porcentaje de elongación fue obtenido con la relación de la deformación máxima alcanzada entre la longitud inicial del material, realizando una comparación entre los dos procesos termoconformado y termoformado, obteniendo como resultado los datos que se muestran en el anexo 2 y figura 9.

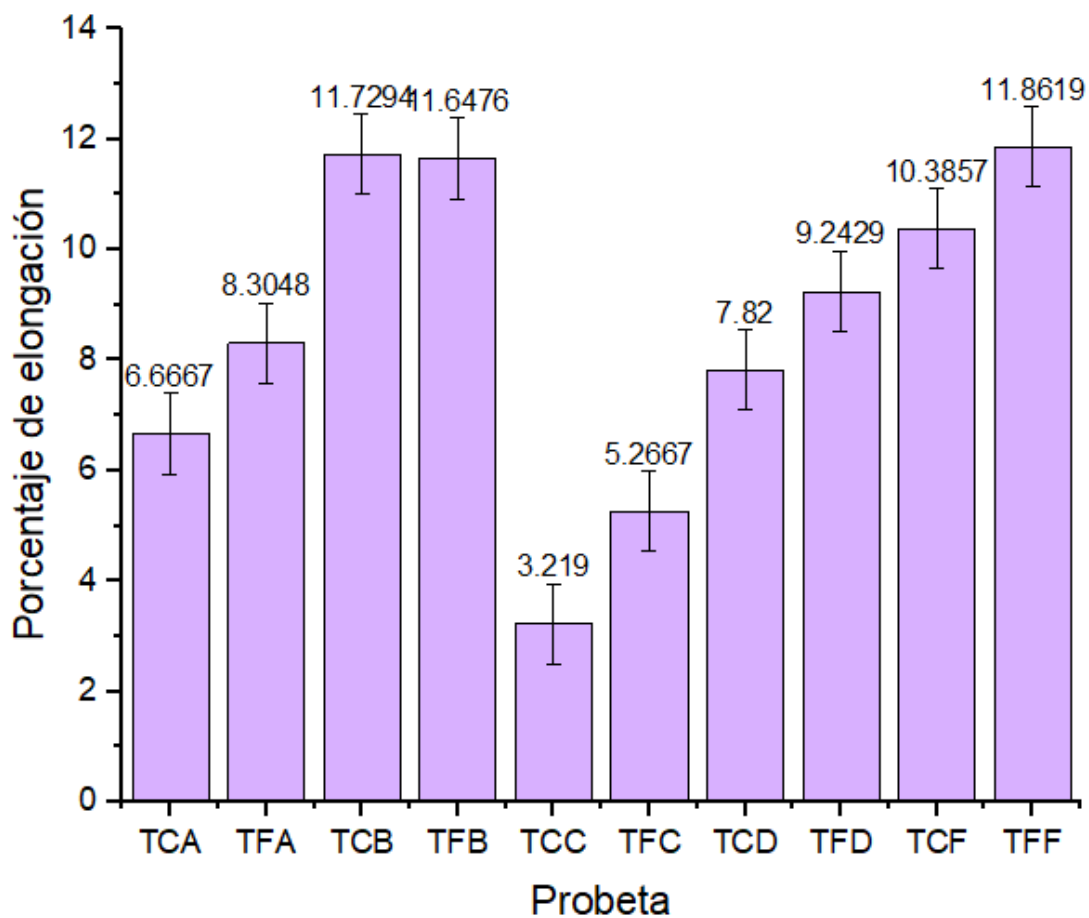


Figura 9 Porcentaje de elongación

En la figura se pueden observar los valores obtenidos en el análisis de porcentaje de elongación de las probetas termoformadas y termoconformadas, de donde es posible apreciar que no se presenta diferencias estadísticamente significativas entre los procesos de termoconformado y termoformado para cada una de las muestras ensayadas y encontrando que las mezclas B y F para ambos procesos fueron los que presentaron los valores más elevados para este parámetro. En general los procesos de termoconformado generan materiales con menor orientación molecular lo que da lugar a un material con mayor capacidad de elongación en comparación con los materiales termoformados (Rodríguez *et al*, 2013) (Chavez *et al*, 2015). El material tiende a ser más flexible en general y puede elongarse más antes de fracturarse, en el presente estudio dicha propiedad no se aprecia contundentemente, ya que como se indicó anteriormente el termoformado no se completó en su totalidad debido a la baja fluidez los materiales base, limitando la expresión del efecto en esta propiedad (Bucolo *et al*, 2019).

7.3.3 Módulo elástico

El módulo elástico fue calculado con la relación al esfuerzo elástico entre la deformación elástica, realizando una comparación entre los dos procesos; termoconformado y termoformado, obteniendo como resultado los datos que se muestran en el anexo 3 y figura a 10.

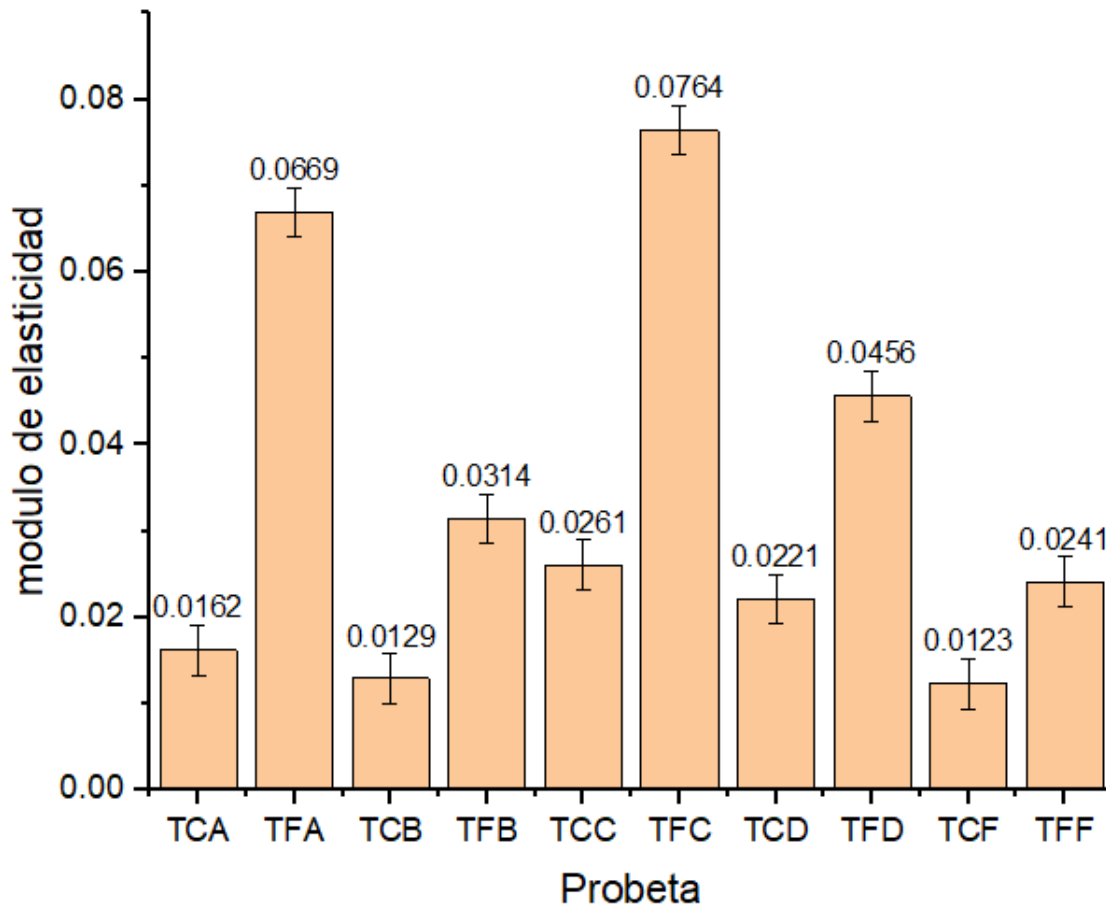


Figura 10 Modulo de elasticidad

De la figura 10 es posible apreciar que existen diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) entre los dos procesos, teniendo que las muestras sometidas al proceso de termoformado presentan valores significativamente mayores a los de las termoconformadas. Teniendo que la probeta TFC fue la que registró el dato más elevado con un promedio de 0.0764 Mpa, seguida de la probeta TFA, con 0.0669 MPa en cuanto a este parámetro.

El módulo de elasticidad es una propiedad relacionada estrechamente con la capacidad de un material para resistir la deformación y esta radica en cómo la

rigidez y la flexibilidad del material afectan su capacidad para ser procesados. Los resultados obtenidos para probetas estudiadas con respecto a esta propiedad se ajustan lo reportado ya que como anteriormente se expuso los materiales termoformados tienden a crear una estructura más ordenada y alineada que aumenta la rigidez del material en esa dirección, además se mejora la distribución de las tensiones proporcionando una mayor capacidad para resistir la deformación comparado con una estructura amorfa o menos organizada, como sucede en el termoconformado. Por otro lado, en el termoformado se puede inducir a una mayor densidad de enlaces y una estructura más compacta que puede incrementar el módulo de elasticidad (Bucolo, 2019).

VIII. CONCLUSIÓN

Se obtuvo microcelulosa acetilada a partir de fibras de lechuguilla, así como también almidón de maíz acetilado, con grados de sustitución y porcentaje de acetilo variados de acuerdo con los diferentes tiempos de reacción y acorde a los niveles permitidos para su empleo en la industria alimentaria demostrando la efectividad del proceso. Se obtuvieron envases con diferentes formulaciones variando la presencia de la microcelulosa y el almidón de maíz acetilado, las cuales fueron sometidas a dos procesos diferentes termoconformado y termoformado, de donde es posible apreciar que en ambos procesos se realizó eficientemente la integración y formación del biocomposito, al apreciarse tanto la presencia y modificación en cuanto a las intensidades de las bandas presentes características de los bioempaques, como a la ausencia de grupos funcionales que denoten degradación de los componentes. En lo referente a la caracterización de las propiedades mecánicas, fue posible apreciar que el proceso de termoformado posterior a la termoconformación impacta mejorando la resistencia a la tensión donde los valores promedio más elevados se obtuvieron con la probeta TFA con un nivel de 0.1899 Mpa, para el módulo elástico el comportamiento fue similar obteniendo un valor promedio de 0.0764 Mpa para la probeta TFC, en cuanto a porcentaje de elongación no se presentaron diferencias estadísticamente significativas en cuanto a cada uno de los procesos estudiados. Estos comportamientos son atribuidos al mayor ordenamiento que se genera al llevar a cabo el proceso de termoformado, sin expresarse en su totalidad para el porcentaje de elongación ya que el proceso no se llevó a cabo por completo. Se obtuvieron resultados positivos en los envases fabricados mediante el proceso de termoformado. Sin embargo, este proceso no se completó de manera óptima, ya que durante las pruebas las láminas no pudieron deformarse completamente para ajustarse a la forma del molde. Esto se debió a que el biocomposito no presenta la fluidez necesaria para una formación adecuada. Para trabajos futuros, se sugiere considerar el uso de un biopolímero que aporte esta propiedad.

IX. BIBLIOGRAFÍA

- Ait-Oubahou, A., Hanani, Z. A. N., & Jamilah, B. (2019). Packaging. In *Postharvest Technology of Perishable Horticultural Commodities* (pp. 375–399). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813276-0.00011-0>
- Al-Tayyar, N. A., Youssef, A. M., & Al-hindi, R. (2020). Antimicrobial food packaging based on sustainable Bio-based materials for reducing foodborne Pathogens: A review. In *Food Chemistry* (Vol. 310). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125915>
- Amaya Pinos, J. B. (2021). *ESTUDIO DE LA OBTENCIÓN DE UN MATERIAL POLIMÉRICO BIODEGRADABLE A PARTIR DE LOS DESECHOS DE LA YUCA POR ADICIÓN DE AGENTES PLASTIFICANTES.*
- Anukiruthika, T., Sethupathy, P., Wilson, A., Kashampur, K., Moses, J. A., & Anandharamakrishnan, C. (2020). Multilayer packaging: Advances in preparation techniques and emerging food applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(3), 1156–1186. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12556>
- Ashori, A., Babae, M., Jonoobi, M., & Hamzeh, Y. (2014). Solvent-free acetylation of cellulose nanofibers for improving compatibility and dispersion. *Carbohydrate Polymers*, 102(1), 369–375. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.11.067>
- Ávila Ramírez, J. A., Gómez Hoyos, C., Arroyo, S., Cerrutti, P., & Foresti, M. L. (2016). Acetylation of bacterial cellulose catalyzed by citric acid: Use of reaction conditions for tailoring the esterification extent. *Carbohydrate Polymers*, 153, 686–695. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.08.009>
- Bennett, G. D. (2005). *A Green Polymerization of Aspartic Acid for the Undergraduate Organic Laboratory.* www.JCE.DivCHED.org
- Bertoldo, M. (2018). Influence of molecular orientation on the mechanical properties of polymeric materials. *Journal of Applied Polymer Science*, 135(10), 45842. <https://doi.org/10.1002/app.45842>
- Bhargava, N., Sharanagat, V. S., Mor, R. S., & Kumar, K. (2020). Active and intelligent biodegradable packaging films using food and food waste-derived

- bioactive compounds: A review. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 105, pp. 385–401). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.09.015>
- Bucolo, P. M., & Ruocco, S. L. (2019). Influence of temperature and viscosity on the thermoforming of thermoplastic polymers. *Polymers*, 11(12), 1985. <https://doi.org/10.3390/polym11121985>
- Castillo Juárez, M. J., & Hernández Montiel, F. J. (2024). *Biodegradable packaging for abrasive products*.
- Chandramohan, D., & Marimuthu, & K. (2011). A REVIEW ON NATURAL FIBERS. In *IJRRAS* (Vol. 8, Issue 2). www.arpapress.com/Volumes/Vol8Issue2/IJRRAS_8_2_09.pdf
- Chávez, J., & Morales, D. (2015). Influence of processing conditions on the mechanical properties of thermoplastic materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(12), 2994-3003. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.08.014>
- Chawla, R., Sivakumar, S., & Kaur, H. (2021). Antimicrobial edible films in food packaging: Current scenario and recent nanotechnological advancements- a review. In *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications* (Vol. 2). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2020.100024>
- Dewi, A. M., Desi, N. E., & Tethool, E. (2019). *Effect of Acetylation Method on Characterization of Cellulose Acetate based Sago "hampas."* <https://www.researchgate.net/publication/332113015>
- Drago, E., Campardelli, R., Pettinato, M., & Perego, P. (2020). Innovations in smart packaging concepts for food: An extensive review. In *Foods* (Vol. 9, Issue 11). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/foods9111628>
- Duffó, G. S. (2012). Una mirada a los biomateriales. *Instituto de Energía y Desarrollo Sustentable.*, 69–70.
- Fonseca-García, A., Jiménez-Regalado, E. J., & Aguirre-Loredo, R. Y. (2021). Preparation of a novel biodegradable packaging film based on corn starch-

- chitosan and poloxamers. *Carbohydrate Polymers*, 251. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117009>
- Foresti VER, M. L., Foresti, M. L., Tupa, M. V, Ávila Ramírez, J. A., Cerrutti, P., & Vázquez, A. (2014). ACETILACIÓN SOSTENIBLE DE BIOPOLÍMEROS MEDIADA POR UN α -HIDROXIÁCIDO DE ORIGEN NATURAL. In *Anales Acad. Nac. de Cs. Ex., Fís. y Nat., tomo* (Vol. 66).
- Gupta, V., Biswas, D., & Roy, S. (2022). A Comprehensive Review of Biodegradable Polymer-Based Films and Coatings and Their Food Packaging Applications. In *Materials* (Vol. 15, Issue 17). MDPI. <https://doi.org/10.3390/ma15175899>
- Hernandez, P. I. A. (n.d.). *Obtención y caracterización de nanocelulosa como refuerzo de un biocomposito.*
- Hernández Pérez, I. A. (2021). *Obtención y caracterización de nanocelulosa a partir de fibras de lechuguilla como refuerzo de un biocomposito.*
- Isidro, L. A. G. (2019). *Establecimiento de las condiciones para la obtención de micro celulosa a partir de fibras de lechuguilla (Agave lechuguilla Tor.) mediante tratamiento químico-mecánico.*
- Kalpana, S., Priyadarshini, S. R., Maria Leena, M., Moses, J. A., & Anandharamakrishnan, C. (2019). Intelligent packaging: Trends and applications in food systems. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 93, pp. 145–157). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.09.008>
- Khodaei, D., Álvarez, C., & Mullen, A. M. (2021). Biodegradable packaging materials from animal processing co-products and wastes: An overview. In *Polymers* (Vol. 13, Issue 15). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/polym13152561>
- Kim, I., Viswanathan, K., Kasi, G., Thanakkasaranee, S., Sadeghi, K., & Seo, J. (2022). ZnO Nanostructures in Active Antibacterial Food Packaging: Preparation Methods, Antimicrobial Mechanisms, Safety Issues, Future Prospects, and Challenges. In *Food Reviews International* (Vol. 38, Issue 4, pp. 537–565). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1737709>

- Kola, V., & Carvalho, I. S. (2023). Plant extracts as additives in biodegradable films and coatings in active food packaging. In *Food Bioscience* (Vol. 54). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102860>
- Kumar, P., Tanwar, R., Gupta, V., Upadhyay, A., Kumar, A., & Gaikwad, K. K. (2021). Pineapple peel extract incorporated poly(vinyl alcohol)-corn starch film for active food packaging: Preparation, characterization and antioxidant activity. *International Journal of Biological Macromolecules*, *187*, 223–231. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.07.136>
- Lin, D., Zhou, W., Yang, Z., Zhong, Y., Xing, B., Wu, Z., Chen, H., Wu, D., Zhang, Q., Qin, W., & Li, S. (2019). Study on physicochemical properties, digestive properties and application of acetylated starch in noodles. *International Journal of Biological Macromolecules*, *128*, 948–956. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.01.176>
- López, A. R. C., Castillo, H. S. V., Trochez, J. J. P., Buitrago, C. E. M., & López, R. A. G. (2023). Mechanical properties of films obtained from thermoplastic starch pellets stored under different conditions. *Acta Agronomica*, *72*(3). <https://doi.org/10.15446/acag.v72n3.108129>
- Lukic, I., Vulic, J., & Ivanovic, J. (2020). Antioxidant activity of PLA/PCL films loaded with thymol and/or carvacrol using scCO₂ for active food packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, *26*. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100578>
- Lydekaityte, J., & Tambo, T. (2020). Smart packaging: definitions, models and packaging as an intermediary between digital and physical product management. *International Review of Retail, Distribution and Consumer Research*, *30*(4), 377–410. <https://doi.org/10.1080/09593969.2020.1724555>
- Mahmud, S., Hasan, K. M. F., Jahid, M. A., Mohiuddin, K., Zhang, R., & Zhu, J. (2021). Comprehensive review on plant fiber-reinforced polymeric biocomposites. In *Journal of Materials Science* (Vol. 56, Issue 12, pp. 7231–7264). Springer. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-05774-9>
- Makradi, A., Belouettar, S., Ahzi, S., & Puissant, S. (2007). Thermoforming process of amorphous polymeric sheets: Modeling and finite element simulations.

- Journal of Applied Polymer Science*, 106(3), 1718–1724.
<https://doi.org/10.1002/app.26869>
- Mills, A. (2005). Oxygen indicators and intelligent inks for packaging food. *Chemical Society Reviews*, 34(12), 1003–1011. <https://doi.org/10.1039/b503997p>
- Mohamed, M. A., Jaafar, J., Ismail, A. F., Othman, M. H. D., & Rahman, M. A. (2017). Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy. In *Membrane Characterization* (pp. 3–29). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63776-5.00001-2>
- Nandiyanto, A. B. D., Oktiani, R., & Ragadhita, R. (2019). How to read and interpret ftir spectroscope of organic material. *Indonesian Journal of Science and Technology*, 4(1), 97–118. <https://doi.org/10.17509/ijost.v4i1.15806>
- Nesic, A., Castillo, C., Castaño, P., Cabrera-Barjas, G., & Serrano, J. (2020). Bio-based packaging materials. In *Biobased Products and Industries* (pp. 279–309). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818493-6.00008-7>
- Olagunju, A. I., Omoba, O. S., Enujiugha, V. N., Wiens, R. A., Gough, K. M., & Aluko, R. E. (2020). Influence of acetylation on physicochemical and morphological characteristics of pigeon pea starch. *Food Hydrocolloids*, 100. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105424>
- Oropeza González, R. A., Montes Hernández, A. I., Alberto, C., & Pereira, P. (2016). Películas biodegradables a base de almidón: propiedades mecánicas, funcionales y biodegradación Biodegradable films based on starch: mechanical/functional properties and biodegradation. *Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 7(1), 65–093. <https://sites.google.com/site/1rvcta>
- Perera, K. Y., Hopkins, M., Jaiswal, A. K., & Jaiswal, S. (2024). Nanoclays-containing bio-based packaging materials: properties, applications, safety, and regulatory issues. In *Journal of Nanostructure in Chemistry* (Vol. 14, Issue 1, pp. 71–93). Springer Medizin. <https://doi.org/10.1007/s40097-023-00525-5>
- Posada, J. C., & Montes-Florez, E. (2021). Revisión: materiales poliméricos biodegradables y su aplicación en diferentes sectores industriales. *Informador Técnico*, 86(1). <https://doi.org/10.23850/22565035.3417>

- Rahman, M., & Brazel, C. S. (2004). The plasticizer market: An assessment of traditional plasticizers and research trends to meet new challenges. In *Progress in Polymer Science (Oxford)* (Vol. 29, Issue 12, pp. 1223–1248). <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2004.10.001>
- Raju, R., Bridges, G. E., & Bhadra, S. (2020). Wireless passive sensors for food quality monitoring: Improving the safety of food products. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 62(5), 76–89. <https://doi.org/10.1109/MAP.2020.3003216>
- Rodríguez, A., & González, S. (2013). *Procesos de conformado de polímeros*. Editorial Universitaria.
- Rodrigues, C., Souza, V. G. L., Coelho, I., & Fernando, A. L. (2021). Bio-based sensors for smart food packaging—current applications and future trends. In *Sensors* (Vol. 21, Issue 6, pp. 1–24). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/s21062148>
- Rodríguez Sepúlveda L.J, & Orrego Alzate C.E. (2016). *Aplicaciones de mezclas de biopolímeros y polímeros sintéticos*.
- Rodríguez Sepúlveda, L. J., & Orrego Alzate, C. E. (2016). *Aplicaciones de mezclas de biopolímeros y polímeros sintéticos*.
- Sarkar, S., & Aparna, K. (2020). Food Packaging and Storage. In *Research Trends in Home Science and Extension*. AkiNik Publications. <https://doi.org/10.22271/ed.book.959>
- Shah, A., Masoodi, F. A., Gani, A., & Ashwar, B. A. (2017). Physicochemical, rheological and structural characterization of acetylated oat starches. *LWT*, 80, 19–26. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.01.072>
- Shah, Y. A., Bhatia, S., Al-Harrasi, A., Afzaal, M., Saeed, F., Anwer, M. K., Khan, M. R., Jawad, M., Akram, N., & Faisal, Z. (2023). Mechanical Properties of Protein-Based Food Packaging Materials. In *Polymers* (Vol. 15, Issue 7). MDPI. <https://doi.org/10.3390/polym15071724>
- Silva, F. M. (2020). *ESTUDIO DE ESTRUCTURAS Y PROPIEDADES DE UN HIDROGEL INTERPENETRADO*.

- Sodhi, N. S., & Singh, N. (2005). Characteristics of acetylated starches prepared using starches separated from different rice cultivars. *Journal of Food Engineering*, 70(1), 117–127. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.09.018>
- Sperling, L. H. (2006). Introduction to physical polymer science (4th ed.). *Wiley-Interscience*.
- Sydow, Z., & Bieńczyk, K. (2019). The overview on the use of natural fibers reinforced composites for food packaging. In *Journal of Natural Fibers* (Vol. 16, Issue 8, pp. 1189–1200). Taylor and Francis Inc. <https://doi.org/10.1080/15440478.2018.1455621>
- Tafese Awulachew M. (2022). A Review of Food Packaging Materials and Active Packaging System. *International Journal of Health Policy Planning*, 1(1). <https://doi.org/10.33140/ijhpp.01.01.03>
- Thulasisingh, A., Kumar, K., Yamunadevi, B., Poojitha, N., SuhailMadharHanif, S., & Kannaiyan, S. (2022). Biodegradable packaging materials. In *Polymer Bulletin* (Vol. 79, Issue 7, pp. 4467–4496). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s00289-021-03767-x>
- Tian, K., & Bilal, M. (2020). Research progress of biodegradable materials in reducing environmental pollution. *Abatement of Environmental Pollutants: Trends and Strategies*, 313–330. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818095-2.00015-1>
- Torró, R. M., & Greus, A. R. (2010). *DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE BIOCOPÓSITOS ENFIBRADOS PROCEDENTES*.
- Trajkovska Petkoska, A., Daniloski, D., D’Cunha, N. M., Naumovski, N., & Broach, A. T. (2021). Edible packaging: Sustainable solutions and novel trends in food packaging. In *Food Research International* (Vol. 140). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109981>
- Vianna, T. C., Marinho, C. O., Marangoni Júnior, L., Ibrahim, S. A., & Vieira, R. P. (2021). Essential oils as additives in active starch-based food packaging films: A review. In *International Journal of Biological Macromolecules* (Vol. 182, pp. 1803–1819). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.05.170>

- Vlachopoulos, J., & Strutt, D. (2003). Polymer processing. In *Materials Science and Technology* (Vol. 19, Issue 9, pp. 1161–1169). <https://doi.org/10.1179/026708303225004738>
- Wang, J., Euring, M., Ostendorf, K., & Zhang, K. (2022a). Biobased materials for food packaging. In *Journal of Bioresources and Bioproducts* (Vol. 7, Issue 1, pp. 1–13). KeAi Communications Co. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2021.11.004>
- Wang, J., Euring, M., Ostendorf, K., & Zhang, K. (2022b). Biobased materials for food packaging. In *Journal of Bioresources and Bioproducts* (Vol. 7, Issue 1, pp. 1–13). KeAi Communications Co. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2021.11.004>
- Wilczyński, K., Nastaj, A., Lewandowski, A., Krzysztof Wilczyński, K., & Buziak, K. (2019). Fundamentals of global modeling for polymer extrusion. In *Polymers* (Vol. 11, Issue 12). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/polym11122106>
- Xu, Y., Miladinov, V., & Hanna, M. A. (2004). *Synthesis and Characterization of Starch Acetates with High Substitution 1* (Vol. 81, Issue 6).
- Yan, M. R., Hsieh, S., & Ricacho, N. (2022). Innovative Food Packaging, Food Quality and Safety, and Consumer Perspectives. In *Processes* (Vol. 10, Issue 4). MDPI. <https://doi.org/10.3390/pr10040747>

X. ANEXOS

10.1 Estudio estadístico de pruebas mecánicas

10.1.1 Anexo 1. Tensión a la ruptura

Level			Least Sq Mean	
TFA	A		0.18993333	
TFD	A	B	0.16710000	
TFC	A	B	0.16213333	
TFB		B	0.14963333	
TFF		C	0.11863333	
TCD			D	0.07319000
TCB			D	0.06596667
TCF			D	0.05475333
TCA			D	0.04660000
TCC			D	0.04578333

Levels not connected by same letter are significantly different

10.1.2 Anexo 2. Porcentaje de elongación

Level				Least Sq Mean			
TFF	A			11.861905			
TCB	A			11.771429			
TFB	A			11.647619			
TCF	A	B		10.385714			
TFD		B	C	9.242857			
TFA		B	C	D	8.304762		
TCD			C	D	7.823810		
TCA				D	E	6.666667	
TFC					E	F	5.266667
TCC						F	3.219048

Levels not connected by same letter are significantly different

10.1.3 Anexo 3. Módulo elástico

Level		Least Sq Mean
TFC	A	0.07640000
TFA	B	0.06690667
TFD	C	0.04561000
TFB	D	0.03147333
TCC	D E	0.02613000
TFF	D E F	0.02419000
TCD	E F	0.02215000
TCA	F G	0.01629667
TCB	G	0.01290333
TCF	G	0.01236667

Levels not connected by same letter are significantly different