

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Diseño de material biocompuesto a partir de almidón de banano y nanocelulosa bacteriana

INGE-2418

Proyecto Integrador

Previo a la obtención del Título de:

Ingeniero en Materiales

Presentado por:

Angel Andrés Sócola Avendaño

Guayaquil – Ecuador

Año: 2024

Dedicatoria

El presente proyecto lo dedico a mis padres; Modesto y Patricia, mis hermanas; Andreina y Doménica y mis mascotas; Gata y Nina, quienes me apoyaron enormemente a lo largo de mi vida y mi carrera estudiantil. Ustedes, mi familia, siempre serán mi más preciada posesión. A Génesis, por todo su apoyo y cariño, y a las grandes amistades que he hecho en esta etapa, quienes también me han ayudado a crecer.

Agradecimientos

Agradezco todo el apoyo brindado por mi familia durante mis cinco años de carrera, a los profesores de IMAT por los conocimientos adquiridos y su paciencia, por alentarme a seguir persiguiendo mis sueños. También agradezco especialmente a los docentes, ayudantes y compañeros por su guía y consejo durante este proyecto.

Declaración Expresa

Yo, Angel Andrés Sócola Avendaño, acuerdo y reconozco que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al autor que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 29 de mayo del 2024.



Angel Andrés Sócola Avendaño

Evaluadores

David Reyes Ortiz, M. Phil

Profesor de Materia

Andrés Rigail Cedeño, Ph.D

Tutor de proyecto

RESUMEN

Ecuador genera grandes cantidades de residuos orgánicos provenientes de la cosecha y elaboración de alimentos a partir del banano. La descomposición y mala gestión de estos residuos afecta negativamente al ambiente, por lo que es de interés aprovechar esta biomasa. Se propone un diseño de biomaterial de almidón de banano extraído de cáscaras, utilizando nanocelulosa bacteriana (NCB) para mejorar su desempeño mecánico.

Para complementar la matriz se escogió alcohol polivinílico (PVA, 5 %w/v), se utilizó almidón de banano (5 %w/v), glicerina (3 %w/v) como plastificante y ácido cítrico (0,5 %w/v) como compatibilizante. Se evaluó la adición de 2, 5 y 7 %w/w de NCB respecto a la masa seca y se fabricaron películas del biocompuesto a través de moldeo por evaporación de solución en 100 mL de agua destilada.

La matriz alcanzó un esfuerzo y elongación de rotura de 5,15 MPa y 321% respectivamente.

Las composiciones con NCB presentaron aglomeraciones en la superficie, que imposibilitaron la observación de tendencias en las propiedades mecánicas al añadir nanorefuerzo. Estos defectos se atribuyen a una mala dispersión y mezclado insuficiente.

Los resultados presentan la posibilidad de utilizar almidón de banano extraído de cáscaras en productos plásticos para manufacturar productos más sostenibles.

Palabras clave: bioplástico, nanorefuerzo, aglomeraciones, sostenibilidad

ABSTRACT

Ecuador generates substantial quantities of organic waste from the harvesting and processing of banana-based food products. The decomposition and inadequate management of this biomass negatively impact the environment, making it essential to explore its potential utilization. This study proposes the design of a biomaterial based on banana starch extracted from peels, with the incorporation of bacterial nanocellulose (BNC) to enhance its mechanical performance.

The matrix was supplemented with polyvinyl alcohol (PVA, 5% w/v), banana starch (5% w/v), glycerol (3% w/v) as a plasticizer, and citric acid (0.5% w/v) as a compatibilizer. The effects of incorporating 2%, 5%, and 7% w/w of BNC, relative to the dry mass, were evaluated, and biocomposite films were fabricated by solution casting in 100 mL of distilled water.

The matrix without reinforcement exhibited a tensile strength of 5.15 MPa and an elongation at break of 321%. However, the compositions with BNC showed surface agglomerations, which hindered the observation of clear trends in mechanical properties upon the addition of the nanoreinforcement. These defects were attributed to poor dispersion and insufficient mixing.

The results indicate the potential of using banana starch extracted from peels in plastic products to produce more sustainable products.

Keywords: bioplastic, nanoreinforcement, agglomerations, sustainability

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ABSTRACT.....	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS.....	V
SIMBOLOGÍA	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
Capítulo 1.....	1
1. Introducción.....	2
1.1. Descripción del problema	2
1.2. Justificación del problema	3
1.3. Objetivos	4
1.3.1. Objetivo General.....	4
1.3.2. Objetivos Específicos.....	5
1.4. Marco teórico	5
1.4.1. Almidón extraído de cáscaras de banano de baja maduración	5
1.4.2. Almidón termoplástico.....	6
1.4.3. Gelatinización y plastificantes	7
1.4.4. Nanocelulosa bacteriana	8
1.4.5. Mezclas de almidón, NCB y otros polímeros	9
Capítulo 2.....	11
2. Metodología.....	12
2.1. Selección de polímero para mezcla.....	12
2.2. Extracción de almidón de cáscara de banano de rechazo	14
2.3. Obtención de nanocelulosa bacteriana.....	16
2.4. Materiales.....	17
2.5. Diseño experimental y análisis estadístico	18
2.6. Preparación del material	18
2.6.1. Proporciones y nomenclatura.....	18
2.6.2. Moldeo de películas por evaporación de solución.....	19
2.6.2.1. Solución de ABR y aditivos.....	20
2.6.2.2. Solución de PVA.....	20
2.6.2.3. Moldeo y extracción de películas	21

2.7.	Caracterización del material y ensayos realizados.....	22
2.7.1.	Ensayos mecánicos	22
2.7.1.1.	Ensayo de tracción	22
2.7.1.2.	Prueba de resistencia a perforación.....	22
2.7.1.3.	Prueba de resistencia al desgarro	23
2.7.2.	Caracterización a través de ensayos complementarios	23
2.7.2.1.	Microscopía óptica.....	24
2.7.2.2.	Infrarrojo transformado de Fourier	24
2.7.2.3.	Análisis térmico	24
Capítulo 3.....		25
3.	Resultados y análisis.....	26
3.1.	Inconsistencias y aglomeraciones en la película sintetizada.....	26
3.2.	Resultados de ensayos mecánicos.....	27
3.2.1.	Ensayo de tracción	27
3.2.2.	Ensayo de desgarre	29
3.2.3.	Ensayo de resistencia a perforación.....	30
3.3.	Ensayos de caracterización complementarios.....	32
3.3.1.	Espectroscopía infrarroja por Transformada de Fourier.....	32
3.3.2.	Morfología superficial del material	34
3.3.3.	Análisis TGA	35
3.4.	Análisis de costos.....	36
Capítulo 4.....		38
4.	Conclusiones y recomendaciones	39
4.1.	Conclusiones	39
4.2.	Recomendaciones	40
Bibliografía		41
APÉNDICE A.....		49
APÉNDICE B.....		50
APÉNDICE C.....		51

ABREVIATURAS

ABR	Almidón de cáscara de banano
ASTM	American Society for Testing Materials
CA	Ácido cítrico
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FTIR	Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier
HDPE	Polietileno de alta densidad
NCB	Nanocelulosa bacteriana
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
PLA	Ácido poliláctico
PVA	Alcohol polivinílico
T_g	Temperatura de transición vítrea
TGA	Análisis termogravimétrico
TPS	Almidón termoplástico

SIMBOLOGÍA

\$	Dólar estadounidense	min	Minuto
%w/v	Peso a volumen	MPa	Megapascal
&w/w	Peso a peso	N	Newtowns
°C	Grado Celcius	n°	Número
3D	Tercer dimensional	NaOH	Hidróxido de sodio
g	Gramo	nm	Nanómetro
h	Hora	-OH	Grupo hidroxilo
H1	Hipótesis nula	p/p	Partes por millón
Ho	Hipótesis alternativa	rpm	Revoluciones por minuto
J	Julios	Tg	Temperatura de transición vítrea
kg	Kilogramo	wt%	Porcentaje en peso
M	Molaridad	µm	Micrómetro

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1 Etapas de maduración del banano	5
Figura 2. 1 Almidón de cáscara de banana extraído	15
Figura 2. 2 Nanocelulosa bacteriana cultivada	16
Figura 2. 3 Microscopía electrónica de barrido en NCB cultivada en ESPOL.....	17
Figura 2. 4 Mezclador en tres ejes utilizado para homogenización.....	19
Figura 2. 5 Agitación magnética de solución ABR y aditivos.....	20
Figura 2. 6 Solución de PVA resultante.....	21
Figura 2. 7 Estufa utilizada para evaporar solución.....	22
Figura 3. 1 Películas sintetizadas por moldeo de evaporación de solución.....	27
Figura 3. 2 Resultados de ensayos de tracción	28
Figura 3. 3 Aglomeración de NCB en probeta (M-5NCB) para ensayos de tracción	28
Figura 3. 4 Resultados de ensayos de desgarre.....	30
Figura 3. 5 Aglomeración de NCB en probeta (M-7NCB) para ensayo de desgarre	30
Figura 3. 6 Resultados de ensayos de perforación.....	31
Figura 3. 7 Superficie de probetas de ensayo de perforación	32
Figura 3. 8 Comparación de espectros IR.....	33
Figura 3. 9 Micrografías de (a) M-0NCB y (b) M-5NCB	34
Figura 3. 10 Curvas de TGA y DTG de material biocompuesto	35

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. 1 Concentración de amilosa y amilopectina en distintas fuentes de almidón.....	7
Tabla 1. 2 Comparación de tensión de rotura obtenido en mezclas de almidón.....	10
Tabla 2. 1 Matriz de criterios de selección de matriz polimérica	13
Tabla 2. 2 Matriz de selección de alternativas de matriz.....	14
Tabla 2. 3 Componentes de formulación base y concentración de masa.....	19
Tabla 2. 4 Nomenclatura y concentración en peso utilizada de NCB	19
Tabla 2. 5 Matriz de criterios de decisión para selección de mejor formulación	23
Tabla 3. 1 Comparación de resultados TGA y DTG entre composiciones.....	36
Tabla 3. 2 Costo por kilogramo de biocompuesto	37

Capítulo 1

1. Introducción

Los plásticos tradicionales se utilizan en gran medida debido a sus propiedades mecánicas, barrera, facilidad de procesamiento y bajo costo. Sin embargo, su producción no es sostenible a lo largo de los años debido al incremento en el costo de los combustibles fósiles utilizados para su producción y al peligro que representan para el medio ambiente y la salud humana, dado que no son biodegradables [1]. Para combatir esta problemática, la mayoría de los países se ha comprometido a reducir y reemplazar estos materiales por alternativas más sostenibles, como son los bioplásticos.

La industria bananera del Ecuador es muy importante para la economía del país, cubriendo el 29% del mercado internacional [2]. Alrededor del 1% del territorio nacional se destina al cultivo del banano. Sin embargo, solo el 12% del peso total de la planta corresponde a la fruta, resultando en una gran cantidad de subproductos frecuentemente descartados [2]. En el presente proyecto se busca utilizar parte de estos subproductos para la elaboración de un biocompuesto de almidón de banano extraído de cáscaras de fruto de rechazo (ABR) con nanocelulosa bacteriana (NCB) como refuerzo.

1.1. Descripción del problema

En 2023, la cantidad de residuos generados a nivel mundial fue de 1.700 millones de toneladas, de los cuales 350 millones correspondieron a residuos plásticos [3]. En 2022, se generaron 6,27 millones de residuos plásticos en Ecuador; solo el 52% se depositó en vertederos regulados por normativas técnicas y ambientales. Además, la evaluación de circularidad para residuos plásticos en Ecuador fue del 8% [4]. Las consecuencias de la presencia de estos residuos en el ambiente y la salud humana incluyen: biodiversidad alterada por suelo y océanos contaminados, emisión de gases tóxicos a través de la quema de plásticos, tuberías y canales taponados, y la liberación de compuestos tóxicos para los seres vivos [5].

Anualmente, a nivel mundial se generan 110 millones de toneladas de residuos orgánicos provenientes de la cosecha de banano y de productos basados en este [6], mientras que, en Ecuador, se estimó un valor anual de 40 millones de toneladas generadas [2]. Por cada tonelada de banano cosechado, se generan 100 kg de pseudotallo, 150 kg de raquis, 480 kg de hojas y 100 kg de banano de rechazo. Estas partes son materiales vegetales voluminosos y fibrosos, difíciles de descomponer. Como consecuencia, hay mayores tiempos en procesos de descomposición como la fotodegradación, oxidación o degradación bacteriana. A partir de esta situación, se contribuye a múltiples problemas ambientales, como emisión de gases de efecto invernadero, proliferación de patógenos y la contaminación de suelos y agua por exposición a lixiviados [7]. Para combatir esta problemática, se pueden implementar las siguientes estrategias de producción sostenibles: promover el desarrollo de economías circulares en el país, la utilización de materia prima proveniente de residuos del sector agrícola y la manufactura de productos biodegradables [2].

En este contexto, el almidón termoplástico (TPS) es un polímero que ha emergido por su fácil obtención y propiedades ecológicas. Sin embargo, posee propiedades mecánicas insuficientes para las aplicaciones donde se busca reemplazar a los plásticos convencionales [8]. La literatura demuestra que la mezcla de almidón con otros polímeros, sean convencionales o biodegradables, mejora las propiedades mecánicas, haciéndolo un material más adecuado para un mayor número de aplicaciones.

1.2. Justificación del problema

Utilizar residuos orgánicos generados por la producción bananera ecuatoriana podría maximizar la productividad de la tierra destinada a su cultivo, sin perjudicar la cantidad de banano cosechado [2]. Aproximadamente, la cáscara de banano corresponde al 40% del peso de la fruta, el cual es desechado sin ningún postratamiento. La industria de procesamiento de alimentos desecha una gran cantidad de cáscara de banano después de producir chifles,

harina, jugo, gelatina o compota [9]. Una de las aplicaciones más comunes de la cáscara de banano es como alimento para el ganado, sin embargo, se necesitan procesos adicionales debido a su alto contenido de agua, que reduce la cantidad de nutrientes presentes [10].

Por otro lado, a pesar de que el TPS es un material prometedor, hay que tomar en cuenta que Ecuador es un país en vías de desarrollo y, según UNICEF, el porcentaje de desnutrición en niños menores de 2 años en el país es del 27% [11]. Debido a esto, existe el dilema ético sobre utilizar alimentos como almidón de maíz, papa o yuca para la manufactura de productos, por lo que utilizar residuos de banano para extraer almidón es una propuesta atractiva.

Además, el desarrollo del proyecto estimula los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) número 12, que se enfoca en garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles, y 13, que busca adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos. Considerando las consecuencias de los residuos plásticos generados, la cantidad de residuos orgánicos provenientes de la industria bananera y la importancia de dicha industria en Ecuador es crucial encontrar un uso más práctico para la cáscara de banano, beneficiando el medioambiente y la economía circular en el país.

1.3. Objetivos

Considerando la problemática descrita, se define el objetivo general del proyecto integrador y los objetivos específicos requeridos para alcanzarlo.

1.3.1. Objetivo General

Diseñar un material biocompuesto a partir de almidón de banano extraído de cáscara de fruto de rechazo y nanocelulosa bacteriana para agregar valor a los residuos orgánicos generados en la industria bananera del Ecuador.

1.3.2. *Objetivos Específicos*

Determinar la cantidad óptima de nanocelulosa bacteriana que maximice la resistencia mecánica para su uso como películas delgadas mediante ensayos comúnmente realizados en esta categoría de productos.

Caracterizar las propiedades físicas y térmicas de la composición seleccionada utilizando técnicas de microscopía y espectroscopía para analizar la interacción entre los compuestos del biomaterial.

1.4. Marco teórico

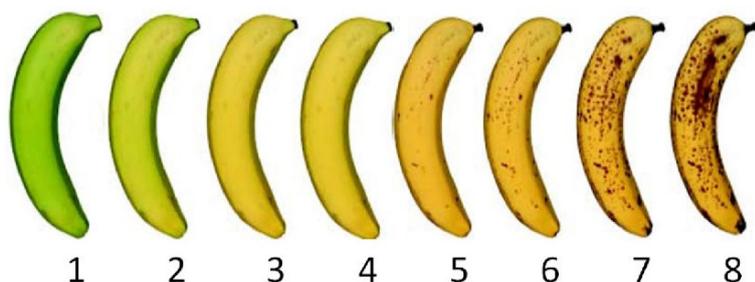
Se detallan los fundamentos teóricos en los que este proyecto se basa. Además, se presenta el estado del arte de mezclas similares a la propuesta.

1.4.1. *Almidón extraído de cáscaras de banano de baja maduración*

La cosecha de banano produce una gran cantidad de subproductos, con distintos aportes de nutrientes y compuestos de interés. *Musa acuminata Cavendish* es el nombre científico de la especie de banano más cosechada en Ecuador. La madurez del banano es un indicador de su calidad como producto de exportación. Algunos datos utilizados para medir la maduración del banano son: edad del racimo después de emerger del pseudotallo, la relación de la cáscara con la pulpa y la firmeza de la fruta. Dependiendo de los resultados, se clasifica el banano como: no maduro, maduro y sobremaduro [12], como se muestra en la figura 1.1.

Figura 1. 1

Etapas de maduración del banano



Nota. '1' es no maduro y '8' es sobremaduro, tomado de [13]

En un estado de maduración bajo, el banano contiene mayor cantidad de almidón y una reducida presencia de azúcar. Cuando la maduración aumenta, la cantidad de almidón y azúcar se invierte debido a que el almidón se convierte en sacarosa a través de la proteína sacarosa-fosfato-sintasa [14]. El contenido de almidón en la cáscara de banano no maduro es de aproximadamente 24% respecto al peso total, disminuyendo hasta un 3% conforme avanza su etapa de maduración. Otros compuestos presentes en la cáscara de banano son grasas trans (hasta el 11 wt%), fibra (hasta el 49,7 wt%) y otros ácidos [15].

1.4.2. Almidón termoplástico

Hoy en día, el almidón es uno de los biopolímeros de mayor interés. Algunas razones de su creciente uso son: su biodegradabilidad, no toxicidad, capacidad de extracción de un sinnúmero de fuentes vegetales y los bajos costos de procesamiento y obtención [14]. El almidón consiste en cadenas de glucosa enlazadas por enlaces α -1,4 y α -1,6 para formar amilosa y amilopectina. La amilosa tiene un carácter lineal, mientras que la amilopectina se encuentra muy reticulada [16]. Las propiedades del almidón varían dependiendo de la fuente, principalmente por las diferencias en el contenido de amilosa y amilopectina. Para la mayoría de las fuentes vegetales, el contenido de amilopectina y amilosa varía entre 70 – 82% y 18 – 30%, respectivamente [8]. TPS hecho de una fuente con alto contenido de amilosa presenta mejor flexibilidad, resistencia y rigidez, pero menor transparencia. Un menor contenido de amilosa ofrece menor viscosidad (mejor procesabilidad) [17]. La tabla 1.1 presenta el contenido de amilosa y amilopectina encontrado en fuentes vegetales comunes de almidón.

Tabla 1. 1*Concentración en peso de amilosa y amilopectina en distintas fuentes de almidón*

Fuente	Amilosa (wt%)	Amilopectina (wt%)
Arrurruz	20,5	79,5
Banana	17	83
Casava	18,6	81,4
Maíz	28	72
Papa	17,8	82,2
Arroz	35	65
Tapioca	16,7	83,3
Trigo	20	80

Nota. Tomado de [18]

A pesar de las ventajas que ofrece, el uso del TPS es muy limitado debido a su baja estabilidad térmica, propiedades mecánicas insuficientes, baja capacidad de actuar como barrera frente a humedad y alta sensibilidad a factores ambientales, como temperatura y pH [19]. Para contrarrestar esta problemática, se ha investigado el diseño de mezclas poliméricas utilizando nanopartículas cerámicas, como zeolitas y arcillas, para mejorar las propiedades mecánicas, barrera y estabilidad del almidón, y mezclas con otros polímeros como plásticos convencionales reciclados o plásticos biodegradables.

1.4.3. Gelatinización y plastificantes

La gelatinización consiste en destruir la estructura semicristalina del almidón para producir una estructura amorfa, mediante calentamiento del almidón en agua o plastificantes. A temperaturas elevadas, el agua ingresa a las zonas amorfas y se forman puentes de hidrógeno entre las moléculas de agua y almidón [20]. Si la gelatinización es incompleta, los gránulos del almidón anterior serán retenidos en la estructura del almidón termoplástico. Estos gránulos pueden reducir las propiedades mecánicas del material [8].

Además de agua, es común el uso de plastificantes para mejorar la gelatinización del almidón. Su adición aumenta el espacio entre cadenas y su interacción entre ellas,

aumentando la movilidad de las cadenas y desplazando la temperatura de transición vítrea (T_g) a temperaturas más bajas. Algunos de los plastificantes más utilizados en almidones son glicerol, sorbitol y urea [8].

1.4.4. Nanocelulosa bacteriana

La nanotecnología es una de las ramas de mayor tendencia en la ciencia de materiales. La principal ventaja ofrecida frente a materiales convencionales es el área superficial expuesta, mucho mayor por su tamaño en escalas nanométrica. Los materiales nanocompuestos aprovechan esta característica para mejorar un conjunto de propiedades específicas sin la necesidad de utilizar altas proporciones del material agregado [21]. La nanocelulosa es de gran interés en la actualidad. Destaca por tener una gran área superficial, alta cristalinidad, baja densidad y mejores propiedades mecánicas en comparación a plásticos convencionales. Además, de forma similar al almidón, es de bajo costo y abundante por su capacidad de encontrarse en varias fuentes vegetales. Su uso como refuerzo en materiales nanocompuestos de matriz polimérica mejora considerablemente el desempeño del material (propiedades mecánicas, térmicas, mejor estabilidad, propiedades barrera y menor absorción de agua). Otra ventaja es que, debido a la alta cantidad de grupos hidroxilos en su superficie, tiene una excelente compatibilidad con matrices poliméricas hidrofílicas, como el almidón [22].

La NCB es celulosa producida de forma exocelular por varias bacterias, siendo las más comunes provenientes del genoma bacteriano *Gluconacetobacter*. En medios acuosos, la bacteria sintetiza celulosa en la interfase entre el líquido y el aire, cuya producción toma en cuenta factores como componentes del medio, temperatura, material de soporte y estructura de superficie. El resultado son fibras de celulosa con diámetros en rangos nanométricos reticulados para formar una red nanoestructurada 3D. La diferencia con la celulosa macro es que contiene menor impurezas o grupos funcionales además de hidroxilos, lo que mejora su

compatibilización con polímeros similares. Además, la red de nanocelulosa bacteriana es estable, un factor importante a tomar en cuenta con la discusión sobre los riesgos a la salud de nanopartículas dispersas [23].

1.4.5. Mezclas de almidón, NCB y otros polímeros

La literatura señala que extensas investigaciones relacionadas a la mezcla de TPS con distintos polímeros se han realizado en las últimas décadas. El principal objetivo de diseñar mezclas con TPS es mejorar sus propiedades mecánicas, para viabilizar su uso en aplicaciones de envasado de alimentos. En varios casos, los polímeros utilizados en las mezclas buscan añadir valor al material, como su adaptación a películas activas en el envasado de alimentos o medir actividad bacteriana. Romagnoli [24] mezcló almidón de casava con polietileno de alta densidad (HDPE) y extracto de té verde para mejorar las propiedades antibacterianas, utilizando como aditivos ácido cítrico (CA) para mejorar la compatibilidad y ácido esteárico para mejorar la procesabilidad en extrusión. El resultado fue un material con propiedades mecánicas similares a la del HDPE puro, utilizando menos plástico virgen por el almidón de casava agregado. La ventaja de este material es su capacidad de utilizar HDPE reciclado, aumentando su circularidad, aunque se pierde la biodegradabilidad aportada por el almidón. Por ello, el uso de polímeros biodegradables también es tendencia en las mezclas de almidón. Z. Wu [25] utilizó almidón de maíz, alcohol polivinílico (PVA), ácido cítrico y glicerol para el diseño de películas biodegradables antimicrobiales. El aumento de las propiedades mecánicas fue significativo, y la mezcla demostró su potencial en envases inteligentes por las propiedades antimicrobiales obtenidas. Ilyas [26] diseñó películas biocompuestas de almidón de banano y fibras lignocelulósicas, con nanocelulosa como refuerzo. Una de las ventajas de este material es el uso de fibras lignocelulósicas. Estas pueden ser extraídas de los residuos de cosecha del banano y se mejoran las propiedades mecánicas al mezclarse con el almidón.

Los procesos que destacan para la elaboración de biocompuestos de almidón son moldeo por evaporación del disolvente y mezclado por fusión. El primero consiste en insertar los precursores en un solvente, comúnmente agua destilada, a temperaturas cercanas a 90 °C y agitación constante. Una vez que los compuestos estén disueltos, se vierte la solución en contenedores que maximicen el área de superficie y pasa por un secado. El resultado es una película delgada [27].

Por otro lado, el mezclado por fusión es un método más escalable, donde influyen la temperatura, el tiempo de mezclado y velocidad de tornillo. A pesar de tener menor dispersión que en moldeo por evaporación del disolvente, se puede adaptar a un procesamiento por extrusión, mejorando su viabilidad económica [28].

La tabla 2 compara el rango del esfuerzo de fluencia medido en distintas mezclas de almidón con polímeros.

Tabla 1. 2

Comparación de esfuerzo y elongación de rotura obtenidos en mezclas de almidón

Mezcla	Esfuerzo de rotura (MPa)	Elongación de rotura (%)	Referencia
TPS + ácido poliláctico (PLA) + fibras de nanocelulosa	9,58 – 19,45	1,40 – 3,40	[27]
TPS + PVA + Cristales de nanocelulosa	3 – 4,5	61,1 – 83,17	[29]
TPS + PVA + CA	19,58 – 45,22	21 – 66	[25]
TPS + PVA + CA	4 – 14	400 – 600	[30]
TPS + HDPE	10 – 20	2 - 3	[24]

Capítulo 2

2. Metodología

En esta sección se detalla el procedimiento para diseñar una mezcla de almidón de cáscara de banano de rechazo, nanocelulosa bacteriana y un polímero seleccionado a través de una matriz de decisión. También se incluye la metodología para la extracción del almidón de la cáscara del banano, cultivo de nanocelulosa bacteriana y fabricación de biocompuesto. Se presentan múltiples composiciones con parámetros de procesamiento establecidos. Se establecen los ensayos para la evaluación de propiedades mecánicas como variable de respuesta, donde la composición con mejor desempeño es caracterizada por ensayos de microscopía, espectroscopía y un análisis económico.

2.1. Selección de polímero para mezcla

Considerando la problemática, fue necesario seleccionar el polímero adecuado para la mezcla propuesta de almidón de banano. Las alternativas fueron evaluadas bajo los siguientes criterios:

- **Compatibilidad con el almidón:** La compatibilización del almidón incorpora el uso de agentes para contrarrestar parcialmente la inmiscibilidad de las mezclas con otros polímeros [31]. Se priorizó el polímero con mayor afinidad y asequibilidad de agentes compatibilizantes.
- **Biodegradabilidad:** Se prefirió una matriz con potencial a biodegradarse con mayor facilidad.
- **Precio:** Se tomó en cuenta el precio por kilogramo del material para mejorar la rentabilidad de la mezcla.

Con los criterios seleccionados, la tabla 2.1 presenta la matriz de selección para matriz polimérica, con sus respectivos pesos donde se priorizó la compatibilidad y biodegradabilidad para mejorar la viabilidad del proyecto.

Tabla 2. 1*Matriz de criterios de selección de matriz polimérica*

Criterios	Compatibilidad	Biodegradabilidad	Precio	Suma	Ponderación
Compatibilidad		1	1	2	0,66
Biodegradabilidad	0		0,5	0,5	0,17
Precio	0	0,5		0,5	0,17
			Total	3	1

Tomando en cuenta los resultados encontrados en la literatura sobre mezclas de almidón en biocompuestos poliméricos [8],[25] se determinaron las siguientes alternativas: 1) alcohol polivinílico (PVA), 2) ácido poliláctico (PLA) y 3) polietileno de alta densidad (HDPE).

PVA: La biodegradabilidad, alta carácter polar, y procesabilidad hacen de este material un candidato para mezclas con almidón. Se han observado puentes de hidrógeno y la formación de estructuras en mezclas de PVA con almidón, donde la adición de compatibilizantes y aditivos mejoran aún más su interacción interfacial [32].

PLA: Este material tiene propiedades adecuadas para uso como película biodegradable en envasado, sin embargo, presenta dificultades para compatibilizarse con almidón [31]. Ambos biopolímeros son inmiscibles y presentan baja adhesión interfacial, afectando su procesabilidad y desempeño. Existen múltiples estrategias para mejorar su compatibilidad como reticulado, modificación química y puentes anfífilicos a través del uso de compatibilizantes, aditivos y modificación del almidón [33].

HDPE: Para reducir la hidrofiliidad nativa del almidón y mejorar sus propiedades mecánicas, se ha mezclado con poliolefinas, como polietileno de alta densidad. Las interacciones interfaciales pueden ser mejoradas a través del uso de modificadores, como anhídrido maleico y plastificantes [34]. Sin embargo, el uso de plásticos convencionales elimina el carácter sostenible de la mezcla, prolongando su tiempo de degradación de manera significativa.

Por último, mediante la base de datos de Ansys Granta Edupack se obtuvo la media del precio por kilogramo del PVA, PLA y HDPE, el cual es: \$1,87/kg, \$1,60/kg y \$1,34/kg respectivamente. Además, para la compatibilización, se tomó en cuenta los reactivos disponibles en los laboratorios de ESPOL. De esta forma, a través de la matriz de alternativas presentada en la tabla 2.2, se escogió PVA para las mezclas con ABR y NCB.

Tabla 2. 2

Matriz de selección de alternativas de matriz

Alternativas	Compatibilidad	Biodegradabilidad	Precio por kg	Suma	Posición
PVA	0,33	0,085	0	0,42	1
PLA	0,22	0,085	0,057	0,36	2
HDPE	0,11	0	0,113	0,22	3

Para mejorar la compatibilización entre ABR y PVA, se utilizó ácido cítrico y glicerina como plastificantes, donde los resultados obtenidos en literatura demostraron su eficacia en mezclas de TPS y PVA [35].

2.2. Extracción de almidón de cáscara de banano de rechazo

Para la extracción de almidón nativo de cáscara de banano de rechazo, se siguió el siguiente procedimiento diseñado por un investigador que anteriormente estaba afiliado a ESPOL.

Para extraer almidón de la cáscara de banano, se siguió el siguiente procedimiento. Se tomó 15 g de cáscara de banano finamente pulverizada y se mezcló con 100 mL de etanol como disolvente. Esta mezcla se agitó durante 2 minutos y se dejó reposar en un agitador a temperatura ambiente durante 16 horas. Posteriormente, se filtraron las mezclas utilizando papel de filtro Whatman n° 1, recolectando los residuos filtrados para su posterior extracción de almidón. El filtrado resultante se centrifugó a 6000 rpm durante 10 minutos para eliminar los micro residuos. Los extractos claros obtenidos se filtraron nuevamente con una membrana de 0,45 μm y se concentraron utilizando un evaporador rotativo. Finalmente, los extractos

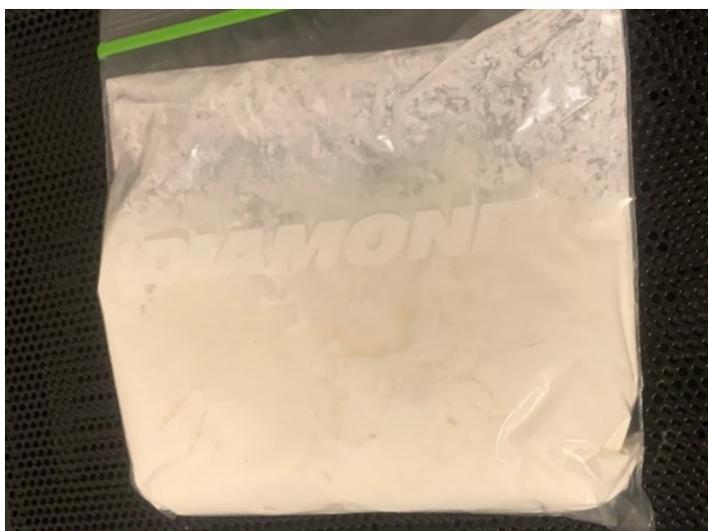
secos de cáscara de banano obtenidos con etanol se almacenaron a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ para su análisis futuro.

Para la extracción del almidón, se preparó una mezcla de polvo de cáscara de banano y agua en una proporción de 1:5 (p/p), la cual se remojó a $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 3 horas y luego se licuó durante 5 minutos. Esta mezcla se tamizó a través de un tamiz de malla 60 para separar el filtrado del residuo. El residuo recolectado se mezcló con 50 mL de etanol al 70% durante 5 minutos y se filtró nuevamente para separar el residuo. Los filtrados recolectados se centrifugaron a 11.000 rpm durante 15 minutos en la centrífuga. El sobrenadante se decantó y el precipitado resultante se mezcló con 100 ml de agua, filtrándose dos veces con una malla de 200 y papel filtro Whatman (tamaño de poro de $2,5\text{ }\mu\text{m}$ y n° 5). Además, se lavó consecutivamente con una solución de hidróxido de sodio 0,1 M y agua desionizada.

Finalmente, el residuo filtrado se secó en un liofilizador y el almidón seco se almacenó a $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ para su análisis posterior. Este procedimiento garantiza una extracción eficiente y pura del almidón de la cáscara de plátano, mediante una combinación de técnicas mecánicas y químicas para obtener el producto final. Las propiedades del ABR son presentadas en el capítulo posterior. La figura 2.1 presenta el ABR extraído.

Figura 2. 1

Almidón de cáscara de banano extraído



2.3. Obtención de nanocelulosa bacteriana

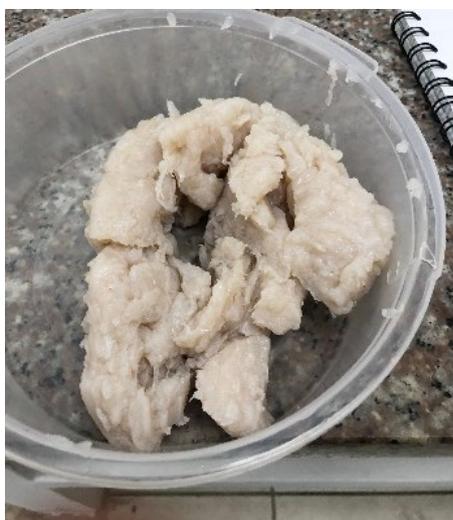
La NCB utilizada fue cultivada siguiendo el procedimiento descrito en [36]. El medio de cultivo contiene infusión de té verde, jugo de nervadura de banano y colonia simbiótica de levaduras y bacterias. Durante la etapa inicial, se llevaron a cabo experimentos en frascos de vidrio de boca ancha de 500 mL que contenían 100 mL de medio de cultivo bajo condiciones aeróbicas.

Para mantener condiciones óptimas, los frascos se cubrieron con papel estéril para evitar la exposición a la luz y se incubaron a una temperatura constante de 30 °C durante 14 días. Al final de este período, se recogieron películas de NCB de la superficie del medio de cultivo. Las películas recogidas fueron sometidas a un proceso de lavado exhaustivo para eliminar las células bacterianas utilizando una solución de 0.4 N de NaOH a 80 °C, seguida de un enjuague con agua destilada hasta alcanzar un pH neutro.

Todos los experimentos se realizaron por triplicado para asegurar la reproducibilidad de los resultados. Las películas de NCB purificadas fueron liofilizadas a -80 °C durante 24 h y pesadas. La caracterización realizada en la NCB cultivada es presentada en el capítulo posterior. La nanocelulosa bacteriana después del enjuague es presentada en la figura 2.2.

Figura 2. 2

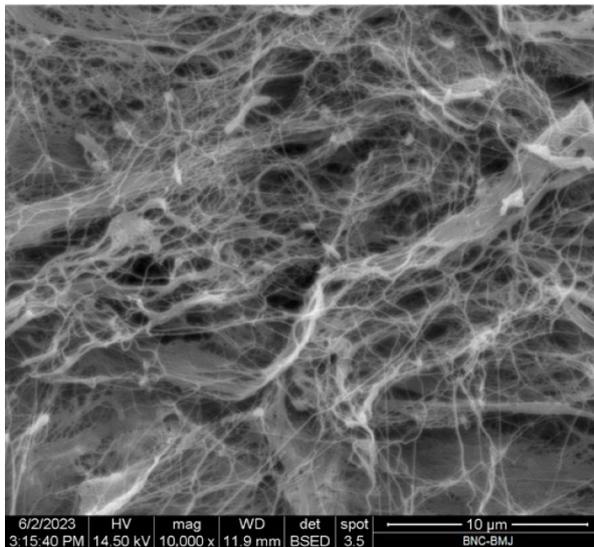
Nanocelulosa bacteriana cultivada



Se proporcionaron las micrografías obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido a la NCB cultivada para observar la estructura y determinar el diámetro promedio de las nanofibras (figura 2.3). El resultado fue una estructura reticulada de nanofibras de celulosa, con un diámetro promedio de 43 nm [36].

Figura 2. 3

Microscopía electrónica de barrido en NCB cultivada en ESPOL



Nota. La micrografía fue extraída de [36].

2.4. Materiales

Los materiales utilizados para la síntesis de bioplástico nanocompuesto fueron:

- **Alcohol polivinílico CAS No. 9002-89-5:** obtenido de una empresa de químicos en Estados Unidos.
- **Almidón nativo extraído de cáscara de banano de rechazo:** banano de rechazo suministrado por asociación local bananera.
- **Nanocelulosa bacteriana:** cultivada en ESPOL.
- **Glicerina CAS No. 56-81-5:** plastificante adquirido de empresa de químicos en Estados Unidos, certificada por asociación química estadounidense.

- **Ácido cítrico:** compatibilizante comprado localmente por el Laboratorio de plásticos de ESPOL.
- **Agua destilada.**

2.5. Diseño experimental y análisis estadístico

Se estableció el diseño con base a la metodología de análisis de varianza ANOVA de una vía, con las propiedades mecánicas como variable de respuesta. Considerando un nivel de significación de 0,05, se planteó:

Hipótesis nula (H_0): La presencia de nanocelulosa bacteriana y su interacción con la matriz no tiene influencia en las propiedades mecánicas del material.

Hipótesis alternativa (H_1): La presencia de nanocelulosa bacteriana y su interacción con la matriz sí tiene influencia en las propiedades mecánicas del material.

Se trabajó con una composición establecida de PVA, ABR, ácido cítrico y glicerina, donde se añadió NCB (2, 5, 7 %w/w del ABR y PVA) con los ajustes necesarios en la composición para que las proporciones de la mezcla anterior sean constantes. Las cantidades añadidas de NCB fueron determinadas con base en referencias de trabajos similares [27]. Para cada composición, se fabricaron 3 películas de dimensiones 40 x 25 cm para la extracción de probetas para ensayos mecánicos.

2.6. Preparación del material

Para establecer la formulación base y los parámetros de moldeo por evaporación de solvente, se tomaron como referencias múltiples fuentes bibliográficas, donde los resultados obtenidos respecto a propiedades mecánicas y homogeneidad fueron relevantes [32],[37],[38],[39].

2.6.1. *Proporciones y nomenclatura*

Para las composiciones realizadas con NCB, se definió una formulación como base (M) de PVA, ABR y aditivos (tabla 2.3).

Tabla 2. 3*Componentes de formulación base y concentración de masa*

Componente	Concentración de masa (% w/v)
PVA	5,0
ABR	5,0
Glicerina	3,0
Ácido cítrico	0,5

Nota. Cantidades en 100 mL de solución de agua destilada

La tabla 2.4 presenta la nomenclatura utilizada para las muestras que contienen NCB.

Tabla 2. 4

Nomenclatura y concentración en peso utilizada de NCB

Nombre de muestra	Contenido porcentual de NCB en peso comparado a PVA + ABR (% w/w)
M-0NCB	0
M-2NCB	2
M-5NCB	5
M-7NCB	7

2.6.2. Moldeo de películas por evaporación de solución

Se prepararon dos soluciones con distintos componentes, mismas que después fueron mezcladas y homogeneizadas con un agitador mecánico a 500 rpm a 70 °C por 10 minutos.

Adicionalmente, se utilizó un mezclador de tres ejes, dos veces, a 1500 rpm por 2 minutos.

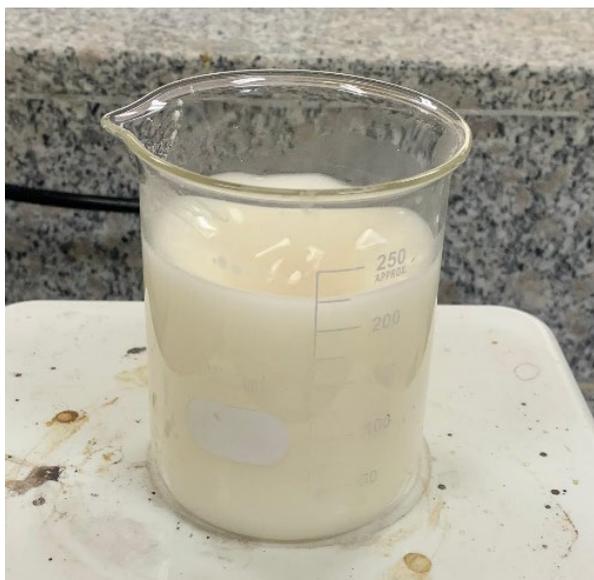
La figura 2.4 presenta el equipo *Speedmixer* utilizado.

Figura 2. 4*Mezclador de tres ejes utilizado para homogenización*

2.6.2.1. Solución de ABR y aditivos. Se utilizó la misma cantidad de ABR, glicerina, CA y NCB descrita en la tabla 2.3, en 50 mL de agua destilada. Las cantidades requeridas fueron medidas por una balanza de precisión. Para prevenir aglomeración de soluto, se utilizó una varilla agitadora vigorosamente y se insertó la barra magnética en el vaso, que fue colocado sobre el agitador magnético. La temperatura de la sustancia fue elevada a 70 °C por 20 minutos para completar la gelatinización del ABR, donde se reguló la velocidad de agitación conforme la viscosidad de la sustancia aumentaba, para mantener una agitación vigorosa. La figura 2.5 presenta la agitación magnética realizada en esta solución.

Figura 2. 5

Agitación magnética de solución de ABR y aditivos



2.6.2.2. Solución de PVA. En un vaso de precipitación con 50 mL de agua destilada, se encendió el agitador magnético a 800 rpm para prevenir aglomeración de PVA, que fue agregado en pequeñas cantidades. Se ajustó la velocidad del agitador conforme la viscosidad aumentaba para tener agitación moderada, y la temperatura fue aumentada gradualmente hasta alcanzar los 90 °C. Después de 10 minutos de haber añadido todo el PVA, se removió la barra magnética y se utilizó el agitador mecánico a 400 rpm por 30 minutos para evitar la formación de espuma en la superficie. Se disminuyó la temperatura de

la plataforma del agitador magnético para prevenir excesiva evaporación de solvente. Trascurrido el tiempo, para eliminar burbujas y espuma formadas en la solución, se tapó el vaso con papel aluminio y se dejó reposar a temperatura ambiente por tres horas. El resultado fue una solución viscosa y transparente, sin la presencia de aglomeraciones de PVA en el medio o las paredes del contenedor. La figura 2.6 presenta la solución de PVA en una etapa inicial.

Figura 2. 6

Solución de PVA resultante



2.6.2.3. Moldeo y extracción de películas. Homogenizada la solución, esta fue vertida en moldes recubiertos de teflón, de dimensiones adecuadas para los ensayos mecánicos. Para promover una película de espesor uniforme, se aprovechó la viscosidad de la solución para esparcirla sin manipularla, en la caja (figura 2.7).

Para la evaporación del solvente, la caja fue introducida en una estufa a 50 °C por 24 horas.

El espesor de las películas resultantes fue de $0,17 \pm 0,001$ mm.

Figura 2. 7

Estufa utilizada para evaporar solución



2.7. Caracterización del material y ensayos realizados

Las propiedades mecánicas de las películas fueron medidas por los siguientes ensayos mecánicos con el objetivo de determinar la formulación con mejor desempeño y realizar ensayos complementarios para observar su morfología, estructura y comportamiento a degradación térmica.

2.7.1. Ensayos mecánicos

Se tomaron en cuenta los siguientes métodos y estándares para películas plásticas en condiciones ambientales de 23 °C y humedad relativa inferior a 55%.

2.7.1.1. Ensayo de tracción. Con base en la normativa ‘ASTM D882: método de prueba estándar de propiedades de tracción en películas plásticas’, se analizaron 5 probetas para cada composición con el objetivo de determinar la tensión y elongación a la rotura. La tasa de separación de las agarraderas fue de 50 mm · min⁻¹.

2.7.1.2. Prueba de resistencia a perforación. Con la norma ‘ASTM D5748: método de ensayo estándar para la resistencia a la punción de película envoltura extensible’, se midió la resistencia a la penetración de un objeto a una velocidad estándar, con el objetivo de medir la energía de punción de cada composición y evaluar la diferencia de tenacidad entre composiciones. La velocidad del ensayo fue de 250 mm · min⁻¹.

2.7.1.3. Prueba de resistencia al desgarro. Con la norma ‘ASTM D1938: método de prueba estándar para resistencia a propagación de desgarro en películas plásticas’, se midió la carga y extensión máxima de desgarre, con el objetivo de evaluar su comportamiento frente a este tipo de esfuerzos. La velocidad de las agarraderas fue de 50 mm · min⁻¹.

Con los resultados de los ensayos mecánicos como parámetros, se diseñó una segunda matriz de decisión con el objetivo de determinar la composición con mejor desempeño y realizar ensayos de caracterización complementarios (Tabla 2.5). Se asignó una mayor ponderación para la tensión y elongación a la rotura medida en las muestras debido a que pueden ser comparadas con los resultados obtenidos por otros reportes.

Tabla 2. 5

Matriz de criterios de decisión para selección de formulación con mejor desempeño

Criterios	Tensión a la rotura	Elongación a la rotura	Energía de punción	Carga máxima de propagación de desgarro	Suma	Ponderación
Tensión a la rotura		0,5	1	0,5	2	0,33
Elongación a la rotura	0,5		1	0,5	2	0,33
Energía de punción	0	0		0,5	0,5	0,09
Carga máxima de propagación de desgarro	0,5	0,5	0,5		1,5	0,25
				Total	6	1

2.7.2. Caracterización a través de ensayos complementarios

Para evaluar la morfología, compatibilización y estabilidad térmica, se realizaron los siguientes ensayos de caracterización.

2.7.2.1. Microscopía óptica. La morfología de la superficie fue evaluada por microscopía óptica, con magnificación 1000x.

2.7.2.2. Infrarrojo transformado de Fourier. La compatibilización en las películas fue evaluada al identificar los grupos funcionales presentes en la muestra y realizada mediante infrarrojo transformado de Fourier (FTIR) con números de onda en el rango de $4000\text{ cm}^{-1} - 650\text{ cm}^{-1}$.

2.7.2.3. Análisis térmico: TGA. La degradación térmica de la película fue evaluada a través de un análisis termogravimétrico (TGA) con una rampa de $10\text{ °C} \cdot \text{min}^{-1}$ en una atmósfera controlada de nitrógeno.

Capítulo 3

3. Resultados y análisis

Se analizaron los resultados obtenidos por los ensayos mecánicos las películas sintetizadas, ensayos complementarios en las composiciones de interés y se realizó un análisis de costos tomando en cuenta el precio de cada componente.

3.1. Inconsistencias y aglomeraciones en la película sintetizada

En las películas cuya composición incluye NCB se observaron aglomeraciones en la escala milimétrica. Este compuesto es insoluble en agua, por lo que fue necesario utilizar varios métodos para dispersarla en la solución acuosa y que su distribución sea homogénea al verterla en el molde. La homogenización por agitación magnética, mecánica y ultrasonido resultó en grandes aglomeraciones como se muestra en la figura 3.1, donde (a) es una película de composición M-0NCB y (b), de M-5NCB. El uso del mezclador de tres ejes mejoró la dispersión de NCB en la matriz, aunque todavía resultó en una dispersión insatisfactoria para que el material sea considerado nanocompuesto. Como se muestra en la figura 2.2, la nanocelulosa está presente como un gel, donde sus fuerzas intermoleculares presentan dificultades para romperse a través de agitación común. Además, la viscosidad de la solución aumenta considerablemente en comparación con la solución antes de la gelatinización del ABR y mezcla con PVA, siendo este un factor que dificulta la dispersión del nanorefuerzo en la solución, favoreciendo la formación de aglomeraciones [40]. Estas aglomeraciones de NCB imposibilitaron la obtención de probetas para los ensayos mecánicos con nanorefuerzo distribuido de forma homogénea, por lo que se intentó obtener probetas que contengan NCB en su matriz, a pesar de que se desconozca el contenido real de NCB en cada probeta. También es importante destacar que estas aglomeraciones causan defectos y concentradores de estrés que actúan como vacíos [41], dando lugar a inconsistencias en los resultados de los ensayos mecánicos.

Figura 3. 1

Películas sintetizadas por moldeo de evaporación de solución



Nota. (a) izquierda y (b) derecha.

Con base en los reportes realizados por otros autores, cuando se dispersa exitosamente el nanorefuerzo, múltiples propiedades mecánicas son mejoradas conforme el contenido de NCB aumenta [37], por lo que en las subsecciones siguientes se analizarán las inconsistencias observadas.

3.2. Resultados de ensayos mecánicos

Se presentan y analizan los resultados de los ensayos mecánicos descritos en el capítulo 2.

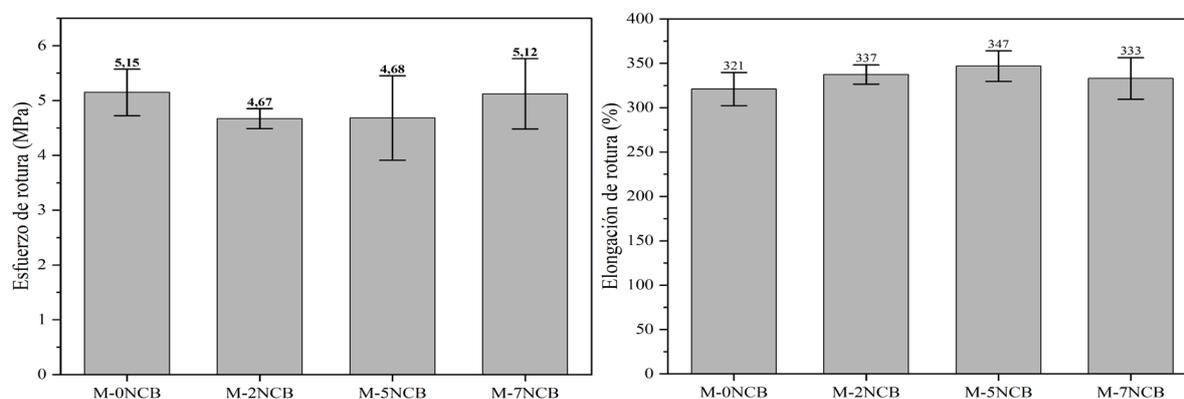
3.2.1. Ensayo de tracción

La figura 3.2 muestra el esfuerzo (a) y elongación de rotura (b) medidos para cada composición. La composición M-0NCB registra un esfuerzo de rotura de 5,15 MPa y una elongación de rotura de 321%; el más bajo de las cuatro composiciones. Con base en el análisis estadístico (Apéndice A), existe una diferencia significativa al añadir NCB a la matriz M ($P < 0,05$). Las probetas extraídas de películas con NCB poseían aglomeraciones de distintos tamaños. Para las cuatro composiciones, los resultados de esfuerzo y elongación de rotura son muy similares respecto a los valores de M-0NCB. Esta composición y M-7NCB alcanzaron los valores más altos de esfuerzo de rotura y los más bajos de elongación de rotura donde esta ligera diferencia en el esfuerzo de rotura muestra una mayor interacción en los

enlaces intermoleculares del ABR y PVA [42], resultando en una menor capacidad de deformarse.

Figura 3. 2

Resultados de ensayos de tracción



Nota. (a) izquierda y (b) derecha.

La desviación estándar del esfuerzo de rotura en M-5NCB y M-7NCB se debe a las muestras seleccionadas para el ensayo, donde se escogieron probetas con distinta cantidad de NCB en su matriz. La figura 3.3 presenta una probeta con aglomeraciones. En el caso de M-2NCB, la desviación estándar es mucho menor respecto a las demás composiciones debido a que las películas con esta cantidad de NCB presentaron una mejor dispersión en forma de pequeños aglomerados en la matriz. A pesar de esto, las aglomeraciones actuaron como concentradores de estrés y vacíos, reduciendo ligeramente el esfuerzo de rotura de la película.

Figura 3. 3

Agglomeración de NCB en probeta (M-5NCB) para ensayo de tracción



Respecto a la matriz, los valores obtenidos muestran una mejora considerable en el esfuerzo de rotura de almidones comunes, donde la literatura presenta resultados en el rango de 0,5 – 2 MPa [43]. De igual forma, la elongación de rotura para el PVA presentó una mejora considerable [44]. Esto es atribuido al contenido de glicerina y ácido cítrico en la composición del material, que actúan como plastificante y compatibilizante respectivamente.

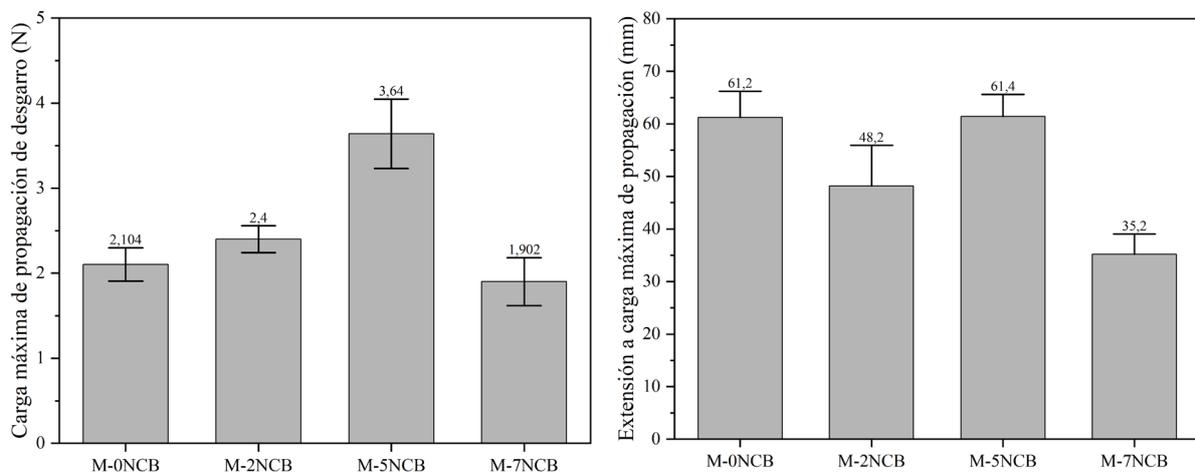
La glicerina añadida incrementó significativamente la elongación de rotura del material, sacrificando el esfuerzo de rotura. Esto se debe a la reducción de enlaces intermoleculares entre amilosas, amilopectinas y ambas, reemplazándolos por puentes de hidrógeno entre moléculas de almidón y glicerina. De esta forma, la flexibilidad del material es mejorada por mayor movimiento de cadenas [43].

Sobre el compatibilizante utilizado, su importancia reside en la capacidad de reticular el almidón y el PVA del material, al formar grupos ésteres, mejorando su esfuerzo de rotura. Sin embargo, [30] reporta que el uso de ácido cítrico en cantidades menores al 10% w/w frente al material seco tiene un leve efecto en mejorar el esfuerzo de rotura, y concluyó que, a mayores cantidades, la tenacidad del material incrementaba de forma significativa y que, a menores cantidades, el aumento sería leve.

Su uso en las películas sintetizadas mejoró el esfuerzo de rotura, al compararlo con la composición base de almidones y PVA de [38], cuyos resultados de esfuerzo de rotura se encuentran en el rango de 1 – 2 MPa.

3.2.2. *Ensayo de desgarre*

La figura 3.4 presenta la carga máxima (a) y su desplazamiento (b) para cada composición del material. La muestra con mayor carga máxima de propagación de desgarro registrada fue M-5NCB, con 3,64 N. Con base en el análisis estadístico (Apéndice C), existe una diferencia significativa al añadir NCB a la matriz M ($P < 0,05$).

Figura 3.4*Resultados de ensayos de desgarro**Nota.* (a) izquierda y (b) derecha.

La figura 3.5 presenta una probeta de la muestra M-7NCB utilizada para el ensayo, donde se observan aglomeraciones de NCB y porosidades. Esta composición presentó la menor carga máxima de propagación de desgarro y extensión debido a los defectos generados por aglomeraciones en las probetas usadas. Sin embargo, M-5NCB y M-2NCB mostraron un aumento en dichas propiedades. Se hipotetiza que si hubo dispersión apropiada de NCB en aquellas composiciones.

Figura 3.5*Aglomeración de NCB en probeta (M-7NCB) para ensayo de desgarro*

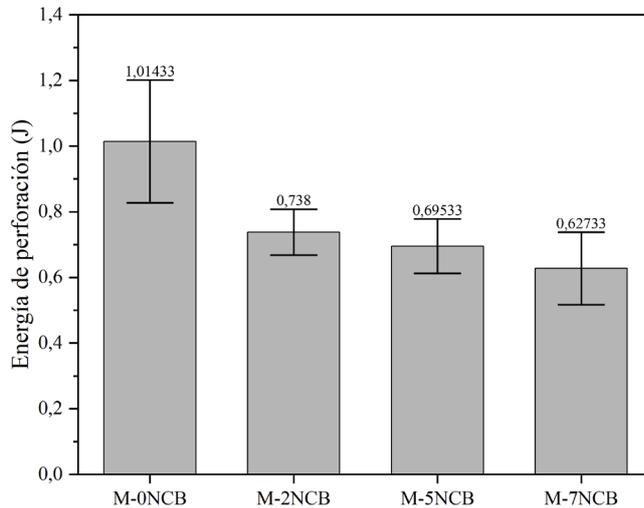
3.2.3. *Ensayo de resistencia a perforación*

La figura 3.6 presenta la energía requerida para perforar el material con distintos valores de NCB añadidos. La muestra con mayor energía de perforación fue M-0NCB con un

valor promedio de 1,01 J. Con base en el análisis estadístico (Apéndice B), existe una diferencia significativa al añadir NCB a la matriz M ($P < 0,05$).

Figura 3. 6

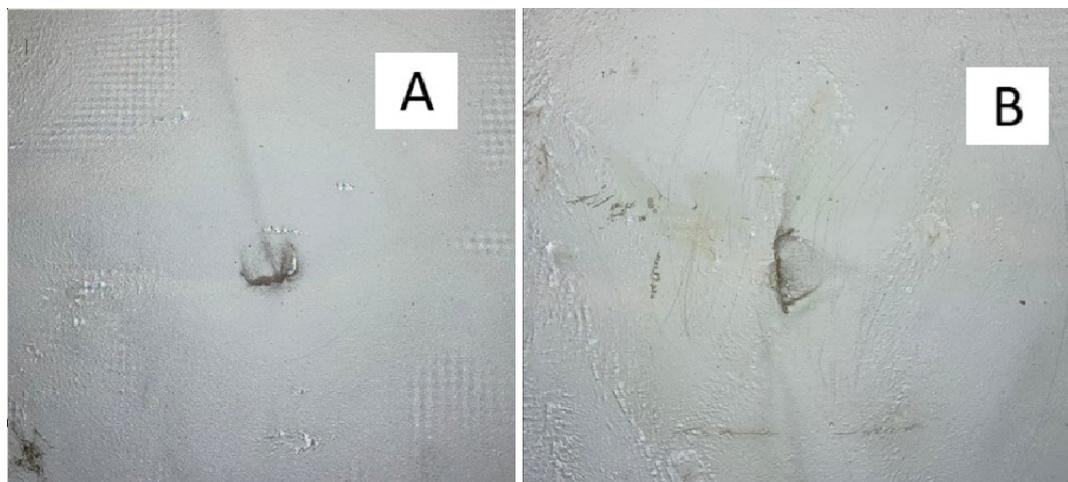
Resultados de ensayos de perforación



De acuerdo con las referencias [29],[27][45], la NCB añadida mejora la resistencia mecánica cuando se agrega en un rango de 0-10 wt% en comparación a la matriz. Sin embargo, la energía de perforación disminuye conforme se añade NCB. A diferencia de los ensayos anteriores, las probetas para ensayos de perforación tienen mayor dimensión, por lo que obtener probetas con distintos contenidos de NCB. Debido a la mala dispersión de NCB, su contenido no es el que se planteó originalmente para cada composición, pero fue posible observar un aumento de NCB en las probetas. Estas aglomeraciones actúan como concentradores de estrés, presentan una interacción débil en la interfase matriz/agregado y baja área superficial efectiva para poder transferir la carga de perforación con éxito al refuerzo [45],[46], debilitando la capacidad de la película de resistir cargas perforantes. La figura 3.7 presenta algunas de las probetas del ensayo de perforación utilizadas, donde (a) corresponde a M-2NCB y (b) es una probeta de M-7NCB.

Figura 3. 7

Superficie de probetas de ensayo de perforación

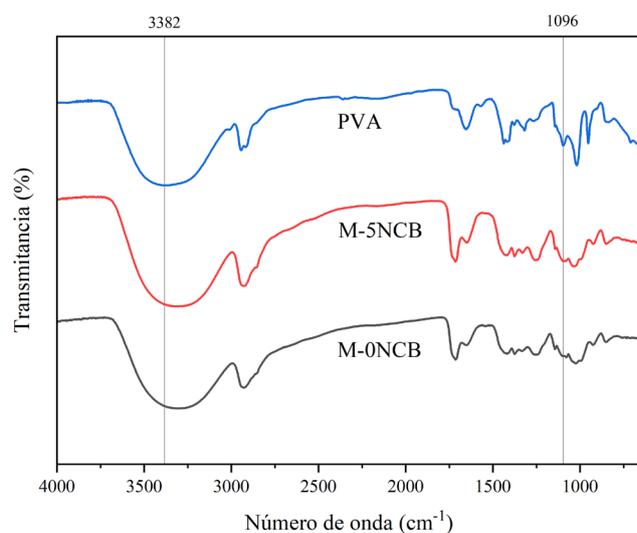


3.3. Ensayos de caracterización complementarios

Con base en los resultados de la figura 3.4 se realizaron los ensayos de caracterización complementarios descritos en el capítulo 2 para las composiciones de M-0NCB y M-5NCB. Además, se compararon las gráficas obtenidas y se evaluó la matriz diseñada con ABR, PVA, aditivos y compatibilizantes.

3.3.1. Espectroscopía infrarroja por Transformada de Fourier

La figura 3.8 compara los espectros IR de una película de PVA, M-0NCB y M-5NCB. Todos los espectros poseen un pico de absorción en $\approx 3382 \text{ cm}^{-1}$, atribuido a la vibración de estiramiento de grupos —OH en ABR, PVA, NCB, glicerina y ácido cítrico [46],[47]. Sin embargo, en las composiciones con mezcla M, el pico de absorbancia se trasladó a $\approx 3307 \text{ cm}^{-1}$, indicando mayor interacción entre los grupos —OH del almidón y plastificantes que aquellas entre PVA y plastificantes. Este desplazamiento demuestra que las fuerzas intermoleculares del PVA se rompen y nuevos enlaces entre PVA, ABR, NCB y plastificantes son formados [46].

Figura 3. 8*Comparación de espectros IR*

Los picos de absorción en $\approx 2925 \text{ cm}^{-1}$ son atribuidos a la vibración de estiramiento de grupos $-\text{CH}_2$ [48]. El enlace C–O asociado al grupo OH de ABR, PVA, NCB y plastificantes presenta un pico de absorción en $\approx 1713 \text{ cm}^{-1}$ [49]. El pico para las vibraciones de estiramiento de grupos C–H y C–O en los anillos polisacáridos de NCB y ABR se encuentra en $\approx 1374 \text{ cm}^{-1}$ [49]. El pico en $\approx 1024 \text{ cm}^{-1}$ corresponde a la vibración del anillo de piranosa de NCB y ABR [47]. Respecto al PVA y en las mezclas M, el pico de absorbancia en $\approx 1096 \text{ cm}^{-1}$ representa los dominios cristalinos del polímero [47].

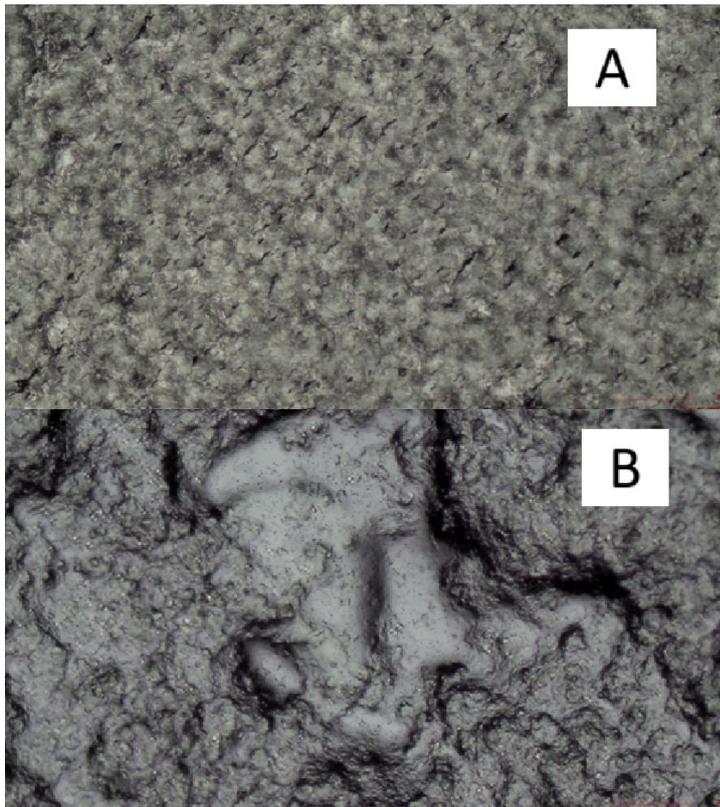
La absorbancia aumenta en múltiples picos en los espectros IR en comparación con la muestra de solo PVA, indicando una mayor intensidad en el grupo funcional atribuido al pico de absorbancia, el cual sugiere una mayor presencia del grupo en la composición [50]. Esto demuestra que el uso de glicerina y CA mejoró la compatibilización en la película sintetizada. Además, múltiples grupos funcionales y enlaces característicos de NCB están presentes a través de sus respectivos picos de absorbancia, indicando que a pesar de que se encontraron aglomeraciones de NCB en las películas sintetizadas, es posible que una parte del nanorefuerzo añadido sí se haya dispersado en la matriz.

3.3.2. *Morfología superficial del material*

Fue posible observar la homogeneidad de la microestructura superficial de la muestra a través de microscopías óptica, por medio de la evaluación de fisuras, aglomeraciones y dispersión en la matriz (figura 3.9) [37].

Figura 3. 9

Micrografías de (a) M-0NCB y (b) M-5NCB



La figura 3.9(a) muestra aglomeraciones de almidón a lo largo de toda la matriz. Además, también se observan fisuras y zonas rugosas de espesor variable. La presencia de aglomeraciones de ABR se atribuye a dos factores: durante la gelatinización, la solución que contiene almidón y plastificantes supera la T_g y se desestructura, dando lugar a mecanismos de aglomeración [51]. Se presume que con un mayor tiempo de agitación mientras la solución esté sobre la T_g , el ABR tendrá mejor dispersión en la matriz, resultando en una superficie más homogénea y con menos fisuras. Por otro lado, el porcentaje de almidón utilizado también tiene efecto en la homogeneidad de la matriz. H. Musa en [52] demostró que una

matriz de PVA y almidón presenta una mejor distribución de partículas de almidón cuando su composición es ≤ 30 wt%, dando lugar en superficies lisas y homogéneas.

La figura 3.9(b) presenta una micrografía de NCB aglomerada en la matriz. Se observan regiones oscuras en la micrografía que representan una variación en el espesor. Además, se observan burbujas en la NCB y sus alrededores. Las aglomeraciones y vacíos por burbujas producen defectos y concentradores de estrés en el material en comparación con los resultados por M. Guimaraes, quien obtuvo una matriz homogénea y lisa con una composición de 20 wt% de almidón de casava [37] y una buena dispersión de fibras de nanocelulosa, observadas por microscopía electrónica de barrido como fibras de dimensiones nanométrica y una mejora en sus propiedades mecánicas.

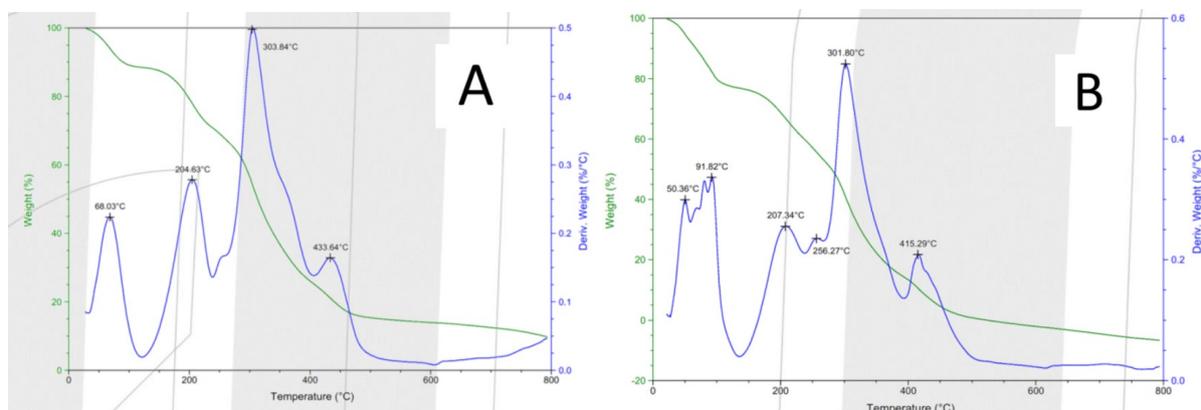
3.3.3. *Análisis TGA*

Se estudiaron los resultados de los ensayos TGA realizados en dos composiciones: M-0NCB y M-5NCB para observar posibles cambios en la estabilidad térmica por presencia de aglomeraciones de NCB en la matriz. En la Figura 3.10 (a) se observa que la temperatura inicial de descomposición se registró a 204 °C, con una pérdida en peso del 11%. Esta coincide con la temperatura de descomposición del PVA, cuyo rango está de 190 – 250 °C. Antes de alcanzar esa temperatura, la pérdida en peso registrada se atribuye a remoción de humedad en el biomaterial [47]. Por otro lado, a 300 °C se registró una pérdida en peso del 47%. Esta etapa es atribuida a la descomposición del almidón [53]. Una descomposición del 80% del biomaterial es alcanzada a 430 °C, representando la etapa final de degradación de los componentes presentes en la formulación.

La figura 3.10(b) presenta resultados similares respecto a la ubicación de los cambios de tasa de degradación. Sin embargo, la principal diferencia está en el porcentaje de peso perdido. La tabla 3.1 presenta la diferencia en el peso perdido entre las dos muestras.

Figura 3. 10

Curvas de TGA y DTG de material biocompuesto



Nota. (a) corresponde a M-0NCB y (b) es M-5NCB

Tabla 3. 1

Comparación de resultados TGA y DTG entre composiciones

Temperatura de inicio de etapas de degradación	Peso perdido (%) M-0NCB (a)	Peso perdido (%) M-5NCB (b)
68 °C	6	10
204 °C	11	30
301 °C	47	60
415 °C	80	90

Una de las características principales de las películas de biomaterial manufacturadas es su alta capacidad de absorber humedad por la alta presencia de grupos hidroxilos [54]. La figura 3.9(a) muestra una mayor homogenización, reduciendo el carácter hidrofílico del biomaterial debido a la reducción de grupos hidroxilos, como se ha demostrado en reportes por la literatura [35]. Como resultado de estas interacciones, la estabilidad térmica de M-0NCB es superior.

3.4. Análisis de costos

La tabla 3.2 presenta el costo y cantidad de los insumos utilizados para sintetizar 1 kg de material biocompuesto. El precio por kilogramo es de \$4,69, donde el ácido cítrico y la nanocelulosa bacteriana son los componentes más costosos.

Tabla 3. 2*Costo por kilogramo de biocompuesto*

Componente	Cantidad (kg)	Costo por kg (\$)	Costo total (\$)	Porcentaje (%)
Almidón de banano	0,370	2,00	0,74	15,1
Alcohol polivinílico	0,370	1,87	0,69	14,1
Glicerina	0,222	4,00	0,89	18,2
Ácido cítrico	0,037	32,00	1,18	24,1
Nanocelulosa bacteriana	0,010	80,00	0,80	16,4
Agua destilada	7,307	0,08	0,59	12,1
		Total	4,89	100

Nota. Los valores de costo fueron extraídos de Ansys Granta y mercados estadounidenses de productos químicos [55],[56]

Capítulo 4

4. Conclusiones y recomendaciones

Se presentan las conclusiones obtenidas a partir de la fabricación y análisis del biocompuesto diseñado, donde se destacan las propiedades mecánicas, efecto de aditivos y compatibilizantes, y efecto de una fallida dispersión del nanorefuerzo. Además, se recomiendan enfoques para mejorar la distribución de NCB y desempeño del material, así como ensayos adicionales para medir el impacto ambiental del biocompuesto.

4.1. Conclusiones

- Se diseñó un material biocompuesto a partir de almidón de banano extraído de cáscaras, alcohol polivinílico y nanocelulosa bacteriana. El material fue fabricado por moldeo de evaporación de solución acuosa, donde pese a que existieron dificultades al dispersar NCB en la matriz polimérica, la composición M-0NCB alcanzó un buen desempeño mecánico y aprovechó con éxito residuos orgánicos de la industria bananera ecuatoriana.
- El uso de glicerina y ácido cítrico permitió que la composición M-0NCB sea resistente y dúctil, alcanzando un esfuerzo de rotura de 5,15 MPa y elongación de rotura de 321%, valores mayores a formulaciones similares en múltiples reportes. Estas propiedades hacen al material apropiado para aplicaciones como película delgada.
- El análisis de la tendencia del material de mejorar sus propiedades mecánicas al añadir NCB fue imposible debido a mala dispersión del nanorefuerzo. La mala dispersión de NCB en la matriz se atribuye a procesos deficientes de mezclado debido a la alta viscosidad de la solución, que dificultó la distribución del nanorefuerzo. Con base en la mejora de las propiedades mecánicas de algunas composiciones con NCB, es posible que hayan existido regiones de la matriz donde el nanorefuerzo fue distribuido con éxito.
- Los ensayos complementarios realizados permitieron observar que M-0NCB tenía aglomeraciones de almidón y grietas que debilitan las propiedades mecánicas del biocompuesto debido a que actúan como concentradores de esfuerzo y defectos.

- Los espectros IR analizados señalan mejor compatibilización entre almidón de banano y PVA, atribuido al uso de ácido cítrico. Se identificaron grupos -OH; característicos de los componentes utilizados, C-O y C=O; atribuidos a la NCB y ABR y una reducción en los dominios del PVA debido al reordenamiento de enlaces entre grupos funcionales al añadir plastificantes, compatibilizante y ABR. Mediante la presencia de picos de absorbancia característicos de la NCB, se presume presencia de nanorefuerzo en la matriz analizada.
- El análisis termogravimétrico reveló que, a 68 °C, 204 °C, 301 °C y 415 °C inician las etapas de degradación de los componentes en el biocompuesto. Además, la absorción de humedad y la presencia de aglomeraciones afectaron la estabilidad térmica, con M-0NCB mostrando una estabilidad térmica superior debido a poseer mejor interacción entre sus componentes en comparación a M-5NCB. La mejora en las propiedades térmicas de M-0NCB se atribuye a una mayor homogenización el cual reduce el carácter hidrofílico del biocompuesto

4.2. Recomendaciones

- Modificar la NCB cultivada para mejorar su dispersión en la matriz polimérica mediante tratamiento para hacerla soluble en agua [57], modificación del ABR para mejorar compatibilización al añadir poliésteres en su estructura [30] o mediante la mejora de intensidad de mezclado utilizando equipo de mayor capacidad.
- Utilizar una metodología de superficie de respuesta para optimizar la formulación entre almidón de banano, un material escogido como complemento, aditivos y compatibilizantes donde el esfuerzo de rotura, elongación a la rotura y energía de desgarrado sean las variables de respuesta con el fin de determinar la composición con mejores propiedades mecánicas.
- Analizar la biodegradabilidad del material a través de la normativa ASTM D6400 para evaluar su compostabilidad tomando en cuenta el extenso periodo de tiempo necesario.

Bibliografía

- [1] N. Rustagi, S. K. Pradhan, y R. Singh, “Public health impact of plastics: An overview”, 2011. doi: 10.4103/0019-5278.93198.
- [2] M. P. S. Jiménez y I. Tobes, “Upcycling the Banana Industry in Ecuador: A Methodology to Estimate Biowaste and Catalogue of Bioproducts”, *Int J Adv Sci Eng Inf Technol*, vol. 13, núm. 5, 2023, doi: 10.18517/ijaseit.13.5.19031.
- [3] F. Atik, F. Dhara, M. Hasan, y F. Adnan, “GLOBAL PLASTIC WASTE SCENARIO: A REVIEW ON PRODUCTION, FATE AND FUTURE PROSPECTS”, *Proceedings of the Waste Safe 2023 – 8th International Conference on Integrated Solid Waste and Faecal Sludge Management*, feb. 2023.
- [4] Global Plastic Action Partnership, “Impact Analysis of Interventions and Change Scenarios in Ecuador”, World Economic Forum. Consultado: el 29 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: Impact Analysis of Interventions and Change Scenarios in Ecuador
- [5] O. Kehinde, O. J. Ramonu, K. O. Babaremu, y L. D. Justin, “Plastic wastes: environmental hazard and instrument for wealth creation in Nigeria”, 2020. doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e05131.
- [6] S. Alzate Acevedo, Á. J. Díaz Carrillo, E. Flórez-López, y C. D. Grande-Tovar, “Recovery of Banana Waste-Loss from Production and Processing: A Contribution to a Circular Economy”, 2021. doi: 10.3390/molecules26175282.
- [7] M. Castillo, M. J. K. de Guzman, y J. M. Aberilla, “Environmental sustainability assessment of banana waste utilization into food packaging and liquid fertilizer”, *Sustain Prod Consum*, vol. 37, 2023, doi: 10.1016/j.spc.2023.03.012.

- [8] C. Chaléat, P. J. Halley, y R. W. Truss, “Mechanical Properties of Starch-Based Plastics”, en *Starch Polymers: From Genetic Engineering to Green Applications*, 2014. doi: 10.1016/B978-0-444-53730-0.00023-3.
- [9] M. Hoque y S. Janaswamy, “Biodegradable packaging films from banana peel fiber”, *Sustain Chem Pharm*, vol. 37, 2024, doi: 10.1016/j.scp.2023.101400.
- [10] B. S. Padam, H. S. Tin, F. Y. Chye, y M. I. Abdullah, “Banana by-products: an under-utilized renewable food biomass with great potential”, 2014. doi: 10.1007/s13197-012-0861-2.
- [11] UNICEF Ecuador, “Desnutrición Crónica Infantil”.
- [12] Venkata Satish Kuchi, “Judging Maturity Indices of Banana”, en *Recent Trends & Advances in Food Science & Post Harvest Technology*, 1a ed., vol. 1, New Delhi, 2019, 6, pp. 107–128.
- [13] M. Cabanillas-Carbonell, V. Céspedes-Lluque, M. Yucra-Calla, y J. L. H. Salazar, “Mobile Application with Arduino to Improve the Determination of the Ripening Status of the Fruit”, *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, vol. 16, núm. 14, 2022, doi: 10.3991/ijim.v16i14.29785.
- [14] P. Kumari, S. S. Gaur, y R. K. Tiwari, “Banana and its by-products: A comprehensive review on its nutritional composition and pharmacological benefits”, 2023. doi: 10.1002/efd2.110.
- [15] D. Mohapatra, S. Mishra, y N. Sutar, “Banana and its by-product utilisation: An overview”, 2010.
- [16] C. M. Chandrasekar, H. Krishnamachari, S. Farris, y D. Romano, “Development and characterization of starch-based bioactive thermoplastic packaging films derived from banana peels”, *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, vol. 5, 2023, doi: 10.1016/j.carpta.2023.100328.

- [17] F. Xie *et al.*, “Thermoplastic starch: Current development and future trends”, 2014. doi: 10.7569/JRM.2014.634104.
- [18] M. K. Marichelvam, M. Jawaid, y M. Asim, “Corn and rice starch-based bio-plastics as alternative packaging materials”, *Fibers*, vol. 7, núm. 4, 2019, doi: 10.3390/fib7040032.
- [19] W. Gao, H. Dong, H. Hou, y H. Zhang, “Effects of clays with various hydrophilicities on properties of starch-clay nanocomposites by film blowing”, *Carbohydr Polym*, vol. 88, núm. 1, 2012, doi: 10.1016/j.carbpol.2011.12.011.
- [20] D. Donmez, L. Pinho, B. Patel, P. Desam, y O. H. Campanella, “Characterization of starch–water interactions and their effects on two key functional properties: starch gelatinization and retrogradation”, 2021. doi: 10.1016/j.cofs.2020.12.018.
- [21] H. Abdellaoui, *Mechanics of Nanomaterials and Polymer Nanocomposites*. en Smart Nanomaterials Technology. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023. doi: 10.1007/978-981-99-2352-6.
- [22] S. Tacha, K. Somord, P. Rattanawongkun, U. Intatha, N. Tawichai, y N. Soykeabkaew, “Bio-nanocomposite foams of starch reinforced with bacterial nanocellulose fibers”, en *Materials Today: Proceedings*, 2022. doi: 10.1016/j.matpr.2022.12.049.
- [23] D. Klemm *et al.*, “Nanocelluloses: A new family of nature-based materials”, 2011. doi: 10.1002/anie.201001273.
- [24] C. M. N. Romagnolli, G. P. Leite, T. A. R. Rodrigues, y C. L. Morelli, “Blend of cassava starch and high-density polyethylene with green tea for food packaging”, *Polymers from Renewable Resources*, vol. 11, núm. 1–2, 2020, doi: 10.1177/2041247920952641.

- [25] Z. Wu *et al.*, “Preparation and application of starch/polyvinyl alcohol/citric acid ternary blend antimicrobial functional food packaging films”, *Polymers (Basel)*, vol. 9, núm. 3, 2017, doi: 10.3390/polym9030102.
- [26] R. A. Ilyas *et al.*, “Banana starch nanocomposite films reinforced with nanocellulose”, *Physical Sciences Reviews*, vol. 0, núm. 0, 2023, doi: 10.1515/psr-2022-0034.
- [27] A. Nazrin, S. M. Sapuan, y M. Y. M. Zuhri, “Mechanical, physical and thermal properties of sugar palm nanocellulose reinforced thermoplastic starch (Tps)/poly (lactic acid) (pla) blend bionanocomposites”, *Polymers (Basel)*, vol. 12, núm. 10, 2020, doi: 10.3390/polym12102216.
- [28] F. V. Borbolla-Jiménez *et al.*, “Films for Wound Healing Fabricated Using a Solvent Casting Technique”, 2023. doi: 10.3390/pharmaceutics15071914.
- [29] N. Noshirvani, B. Ghanbarzadeh, H. Fasihi, y H. Almasi, “Starch-PVA Nanocomposite Film Incorporated with Cellulose Nanocrystals and MMT: A Comparative Study”, *International Journal of Food Engineering*, vol. 12, núm. 1, 2016, doi: 10.1515/ijfe-2015-0145.
- [30] J. M. Castro *et al.*, “Thermoplastic starch/polyvinyl alcohol blends modification by citric acid–glycerol polyesters”, *Int J Biol Macromol*, vol. 244, 2023, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2023.125478.
- [31] O. H. P. Gunawardene *et al.*, “Compatibilization of starch/synthetic biodegradable polymer blends for packaging applications: A review”, 2021. doi: 10.3390/jcs5110300.
- [32] A. N. Frone, C. A. Nicolae, R. A. Gabor, y D. M. Panaitescu, “Thermal properties of water-resistant starch - Polyvinyl alcohol films modified with cellulose nanofibers”, *Polym Degrad Stab*, vol. 121, 2015, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2015.10.010.
- [33] C. A. Ávila-Orta, C. A. Covarrubias-Gordillo, H. A. Fonseca-Florido, L. Melo-López, R. Radillo-Ruíz, y E. Gutiérrez-Montiel, “PLA/modified-starch blends and their

- application for the fabrication of non-woven fabrics by melt-blowing”, *Carbohydr Polym*, vol. 316, 2023, doi: 10.1016/j.carbpol.2023.120975.
- [34] A. Taguet, M. N. Bureau, M. A. Huneault, y B. D. Favis, “Toughening mechanisms in interfacially modified HDPE/thermoplastic starch blends”, *Carbohydr Polym*, vol. 114, 2014, doi: 10.1016/j.carbpol.2014.07.073.
- [35] B. Priya, V. K. Gupta, D. Pathania, y A. S. Singha, “Synthesis, characterization and antibacterial activity of biodegradable starch/PVA composite films reinforced with cellulosic fibre”, *Carbohydr Polym*, vol. 109, 2014, doi: 10.1016/j.carbpol.2014.03.044.
- [36] D. Dáger-López, Ó. Chenché, R. Ricaurte-Párraga, P. Núñez-Rodríguez, J. M. Bajaaná, y M. Fiallos-Cárdenas, “Advances in the Production of Sustainable Bacterial Nanocellulose from Banana Leaves”, *Polymers (Basel)*, vol. 16, núm. 8, 2024, doi: 10.3390/polym16081157.
- [37] M. Guimarães, V. R. Botaro, K. M. Novack, F. G. Teixeira, y G. H. D. Tonoli, “Starch/PVA-based nanocomposites reinforced with bamboo nanofibrils”, *Ind Crops Prod*, vol. 70, 2015, doi: 10.1016/j.indcrop.2015.03.014.
- [38] N. Lisdayana, F. Fahma, T. C. Sunarti, y E. S. Iriani, “Thermoplastic Starch–PVA Nanocomposite Films Reinforced with Nanocellulose from Oil Palm Empty Fruit Bunches (OPEFBs): Effect of Starch Type”, *Journal of Natural Fibers*, vol. 17, núm. 7, 2020, doi: 10.1080/15440478.2018.1558142.
- [39] D. Domene-López, M. M. Guillén, I. Martín-Gullón, J. C. García-Quesada, y M. G. Montalbán, “Study of the behavior of biodegradable starch/polyvinyl alcohol/rosin blends”, *Carbohydr Polym*, vol. 202, 2018, doi: 10.1016/j.carbpol.2018.08.137.

- [40] V. Vashisth, K. D. P. Nigam, y V. Kumar, “Nanoparticle de-agglomeration in viscous fluids using different high shear mixer geometries”, *Chem Eng Sci*, vol. 248, 2022, doi: 10.1016/j.ces.2021.117132.
- [41] S. Tamayo-vegas, A. Muhsan, C. Liu, M. Tarfaoui, y K. Lafdi, “The Effect of Agglomeration on the Electrical and Mechanical Properties of Polymer Matrix Nanocomposites Reinforced with Carbon Nanotubes”, *Polymers (Basel)*, vol. 14, núm. 9, 2022, doi: 10.3390/polym14091842.
- [42] T. M. Ejara, S. Balakrishnan, y J. C. Kim, “Nanocomposites of PVA/cellulose nanocrystals: Comparative and stretch drawn properties”, *SPE Polymers*, vol. 2, núm. 4, 2021, doi: 10.1002/pls2.10057.
- [43] J. Tarique, S. M. Sapuan, y A. Khalina, “Effect of glycerol plasticizer loading on the physical, mechanical, thermal, and barrier properties of arrowroot (*Maranta arundinacea*) starch biopolymers”, *Sci Rep*, vol. 11, núm. 1, 2021, doi: 10.1038/s41598-021-93094-y.
- [44] S. Zeng, L. Li, y Q. Wang, “Structure-property correlation of polyvinyl alcohol films fabricated by different processing methods”, *Polym Test*, vol. 126, 2023, doi: 10.1016/j.polymertesting.2023.108143.
- [45] Y. Zare, “Study of nanoparticles aggregation/agglomeration in polymer particulate nanocomposites by mechanical properties”, *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 84, 2016, doi: 10.1016/j.compositesa.2016.01.020.
- [46] P. Boonsuk, A. Sukolrat, S. Chantarak, A. Kelarakis, y C. Chaibundit, “Poly(vinyl alcohol)/modified cassava starch blends plasticized with glycerol and sorbitol”, *J Appl Polym Sci*, vol. 139, núm. 24, 2022, doi: 10.1002/app.52362.

- [47] P. Zhou, Y. Luo, Z. Lv, X. Sun, Y. Tian, y X. Zhang, “Melt-processed poly (vinyl alcohol)/corn starch/nanocellulose composites with improved mechanical properties”, *Int J Biol Macromol*, vol. 183, 2021, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2021.06.011.
- [48] A. H. D. Abdullah, S. Chalimah, I. Primadona, y M. H. G. Hanantyo, “Physical and chemical properties of corn, cassava, and potato starchs”, en *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018. doi: 10.1088/1755-1315/160/1/012003.
- [49] W. T. Wulandari, A. Rochliadi, y I. M. Arcana, “Nanocellulose prepared by acid hydrolysis of isolated cellulose from sugarcane bagasse”, en *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016. doi: 10.1088/1757-899X/107/1/012045.
- [50] U. Riaz y S. M. Ashraf, “Characterization of Polymer Blends with FTIR Spectroscopy”, en *Wiley Blackwell 6*, vol. 9783527331536, 2015. doi: 10.1002/9783527645602.ch20.
- [51] S. Aichayawanich, M. Nopharatana, A. Nopharatana, y W. Songkasiri, “Agglomeration mechanisms of cassava starch during pneumatic conveying drying”, *Carbohydr Polym*, vol. 84, núm. 1, 2011, doi: 10.1016/j.carbpol.2010.11.036.
- [52] B. H. Musa y N. J. Hameed, “Study of the mechanical properties of polyvinyl alcohol/starch blends”, en *Materials Today: Proceedings*, 2020. doi: 10.1016/j.matpr.2019.09.161.
- [53] M. M. Nobrega, J. B. Olivato, C. M. O. Müller, y F. Yamashita, “Biodegradable starch-based films containing saturated fatty acids: Thermal, infrared and raman spectroscopic characterization”, *Polimeros*, vol. 22, núm. 5, 2012, doi: 10.1590/S0104-14282012005000068.
- [54] N. Shuzhen *et al.*, “Enhancing hydrophobicity, strength and UV shielding capacity of starch film via novel co-cross-linking in neutral conditions”, *R Soc Open Sci*, vol. 5, núm. 11, 2018, doi: 10.1098/rsos.181206.

- [55] Fisher Scientific, “Fischer Scientific Chemicals”,
<https://www.fishersci.com/us/en/home.html>.
- [56] Noah Chemicals, “Noah Chemicals Products”, <https://noahchemicals.com/>.
- [57] J. Pang *et al.*, “Synthesis of highly polymerized water-soluble cellulose acetate by the side reaction in carboxylate ionic liquid 1-ethyl-3-methylimidazolium acetate”, *Sci Rep*, vol. 6, 2016, doi: 10.1038/srep33725.

APÉNDICE A

Ensayos realizados y análisis estadístico respectivo

- Ensayo de tracción

Norma ASTM D882

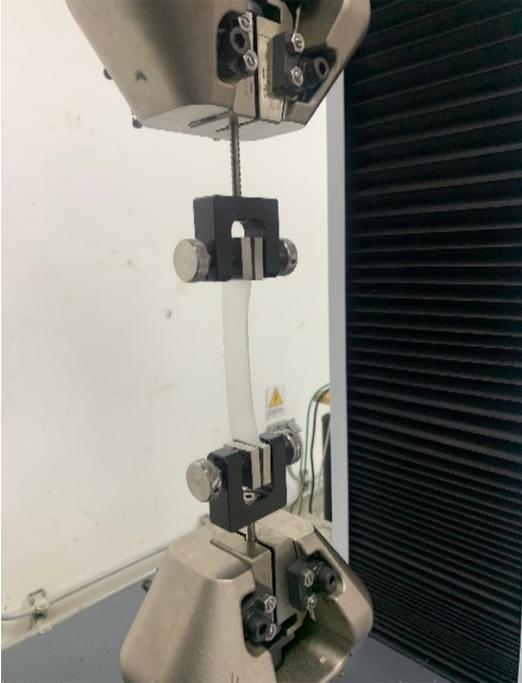
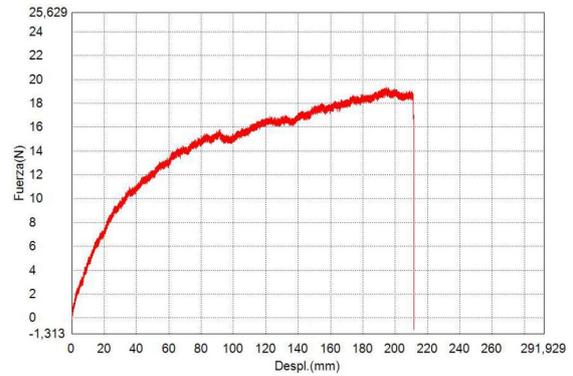


Diagrama carga vs desplazamiento de M-0NCB



Análisis ANOVA de elongación

ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	1720,95	3	573,65	3,9257485	0,02821634	3,23887152
Dentro de los grupos	2338	16	146,125			
Total	4058,95	19				

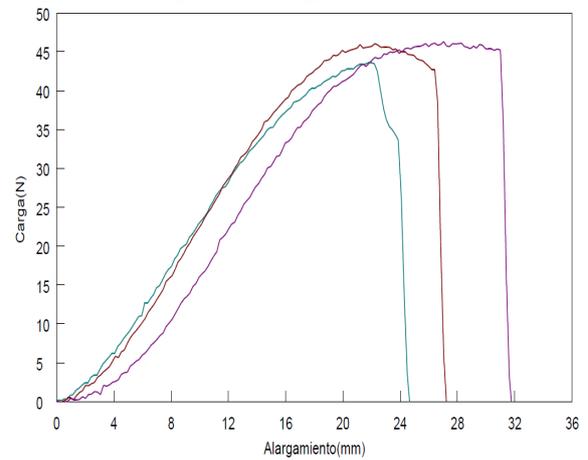
APÉNDICE B

- Ensayo de perforación

ASTM D5748



Diagrama carga vs alargamiento de M-5NCB



Análisis ANOVA para energía de perforación

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,82518775	3	0,27506258	7,3597063	0,00256593	3,23887152
Dentro de los grupos	0,597986	16	0,03737413			
Total	1,42317375	19				

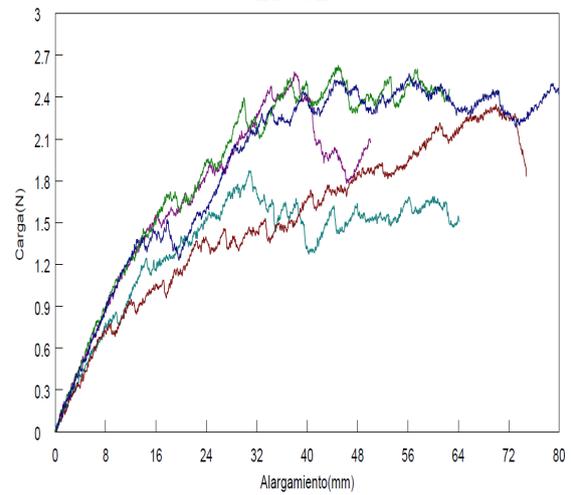
APÉNDICE C

- **Ensayo de desgarro**

ASTM D1938



Diagrama carga vs alargamiento de M-2NCB



Análisis ANOVA para carga máxima de propagación de desgarro

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	9,117455	3	3,03915167	9,86737554	0,00063581	3,23887152
Dentro de los $\{$	4,928	16	0,308			
Total	14,045455	19				