



Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.
Posgrado en Materiales Poliméricos

CARACTERIZACIÓN DE LAS FIBRAS DEL BAGAZO DE
HENEQUÉN Y SU USO EN LA OBTENCIÓN DE
MATERIALES COMPUESTOS CON POLIPROPILENO.

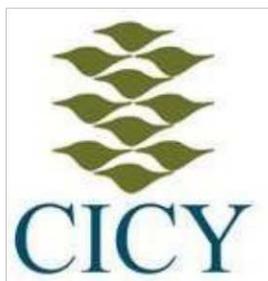
Tesis que presenta
CAN CANUL ANDREY BENJAMÍN

En opción al título de

MAESTRO EN CIENCIAS
(MATERIALES POLIMÉRICOS)

Mérida, Yucatán, México, Abril del 2023

*CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA
DE YUCATÁN, A. C. POSGRADO EN CIENCIAS EN
MATERIALES POIMERICOS*



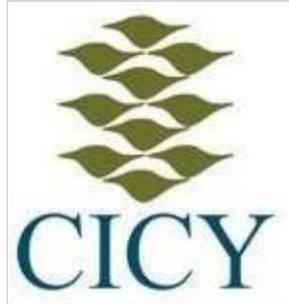
DECLARACIÓN DE PROPIEDAD

Declaro que la información contenida en la sección de Materiales y Métodos, los Resultados y Discusión de este documento proviene de las actividades de investigación realizadas durante el período que se me asignó para desarrollar mi trabajo de tesis, en las Unidades y Laboratorios del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y que a razón de lo anterior y en contraprestación de los servicios educativos o de apoyo que me fueron brindados, dicha información, en términos de la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, le pertenece patrimonialmente a dicho Centro de Investigación. Por otra parte, en virtud de lo ya manifestado, reconozco que de igual manera los productos intelectuales o desarrollos tecnológicos que deriven o pudieran derivar de lo correspondiente a dicha información, le pertenecen patrimonialmente al Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y en el mismo tenor, reconozco que si derivaren de este trabajo productos intelectuales o desarrollos tecnológicos, en lo especial, estos se registrarán en todo caso por lo dispuesto por la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, en el tenor de lo expuesto en la presente Declaración.

Firma: Andrey
Andrey Benjamín Can Canul

Mérida, Yucatán, México, a 17 de abril del 2023

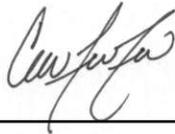
CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA DE YUCATÁN, A. C.
POSGRADO EN CIENCIAS EN MATERIALES POLIMÉRICOS



RECONOCIMIENTO

Por medio de la presente, hago constar que el trabajo de tesis de **Can Canul Andrey Benjamin** titulado “**Caracterización de las fibras del bagazo de henequén y su uso en la obtención de materiales compuestos con polipropileno**”, fue realizado en la Unidad de Materiales, en la línea de materiales para aplicaciones especializadas, en los laboratorios de Química Macromolecular, Trabajo Limpio y CIT-industria del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., bajo la dirección del Dr. Gonzalo Canché Escamilla, perteneciente al Programa de Posgrado en Ciencias en Materiales Poliméricos de este Centro.

Atentamente



Dra. Cecilia Hernández Zepeda
Directora de Docencia

Mérida, Yucatán, México, a 17 de abril de 2023

Agradecimientos

Al CONACYT por la beca otorgada No. 1077734 para la realización de esta investigación.

Al Centro de Investigación Científica de Yucatán por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios de maestría.

Al laboratorio de Química Macromolecular y al Centro de Innovación Tecnológica de la Unidad de Materiales que me brindó el espacio, materiales y recursos para realizar esta investigación.

A mi director de tesis, el Dr. Gonzalo Canché Escamilla por aceptarme en su grupo de trabajo, por su disposición y tiempo para resolver mis dudas, por las revisiones y observaciones realizadas a esta investigación.

A los integrantes de mi comité tutorial y revisores: Dr. Ricardo Herbé Cruz Estrada, Dr. Francisco Javier Moscoso, Dr. Alex Valadez Gonzáles y Dr. Zujey Berenice Cuevas Carballo, por su revisión y comentarios que enriquecieron este trabajo.

Al Q.I. Santiago Duarte Aranda por su valioso apoyo técnico en la caracterización química del bagazo de agave, análisis TGA y micrografías SEM de los materiales.

A mis padres Martha Irene Canul Canul y Benjamin Can May por todo el apoyo brindado y a todas mis hermanas.

A mi novia Evelyn Rubí Pool Pech por todo su apoyo.

Índice

Resumen.....	1
Abstract.....	2
Introducción.....	3
Capítulo 1: Antecedentes	5
1.1 Residuos Orgánicos.....	5
1.1.1 Fuentes de generación de residuos agroindustriales en México.....	6
1.1.2 Residuos lignocelulósicos y fibras naturales.....	9
1.2 Residuos de la industria henequenera	11
1.3 Materiales compuestos	13
1.3.1 Materiales compuestos fibro-reforzado.....	16
1.3.2 Materiales compuestos reforzados con fibras naturales	18
1.3.3 Materiales compuestos con fibras de henequén.....	19
1.4 Procesamiento de materiales compuestos fibro-reforzados con matriz termoplástica	20
1.4.1 Extrusión.	20
1.4.2 Moldeo por compresión.	21
1.4.3 Moldeo por inyección.....	22
Justificación.....	24
Hipótesis	25
Objetivos	25
Objetivo general.....	25
Objetivos específicos.....	25
Capítulo 2. Parte experimental.	26
2.1 Materiales y métodos.....	26
2.1.1 Fibras del bagazo del henequén.....	26
2.1.2 Matriz Polimérica y Aditivos.....	32
2.2 Obtención del material compuesto.....	34
2.2.1 Obtención de laminado del material compuesto	34
2.2.2 Caracterización del material compuesto	35
2.3 Obtención del perfil rectangular.	36
2.3.1 Caracterización del perfil rectangular.....	36
2.3.2 Caracterización térmica por calorimetría diferencial de barrido del perfil rectangular.	38
Capítulo 3: Resultados y discusión.....	39
3.1 Caracterización del bagazo de henequén	39
3.1.1 Morfología del bagazo de henequén	39
3.1.2 Composición química	41
3.1.3 Caracterización térmica.....	42

3.1.4 Propiedades mecánicas de las fibras	43
3.2 Caracterización de los materiales compuestos	44
3.2.1 Propiedades térmicas de los materiales compuestos	44
3.2.2 Propiedades mecánicas.	45
3.2.3 Micrografías SEM de los materiales compuestos	49
3.2.4 Propiedades reológicas	51
3.3 Obtención y Caracterización del perfil rectangular	55
3.3.1 Morfología del perfil (SEM)	56
3.3.2 Calorimetría Diferencial de Barrido del perfil.....	57
3.3.3 Propiedades mecánicas a flexión	58
Conclusiones.....	60
Bibliografía	62

Lista de tablas

Tabla 1. 1 Tipos de residuos orgánicos y sus características.	5
Tabla 1. 2 Algunas fuentes de generación de residuos agroindustriales	7
Tabla 1. 3 Composición de cenizas y extractivos	7
Tabla 1. 4 Clasificación de los materiales compuestos dependiendo de la matriz o de la forma de la fase dispersa	14
Tabla 1. 5 Clasificación, ejemplos y aplicaciones de fibras naturales.	18
Tabla 1.6 Fibras naturales y sus propiedades mecánicas [54].....	19
Tabla 2. 1 Distribución de longitud de la fibra del bagazo de Henequén retenida en los tamices..	29
Tabla 2. 2 Propiedades del polipropileno Valtec HP423M	33
Tabla 2. 3 Propiedades del Struktol TPW113	33

Lista de figuras

Figura 1. 1 Principales biopolímeros que conforman los residuos lignocelulósicos.....	9
Figura 1. 2 Estructura de la pared celular de la célula vegetal.....	10
Figura 1. 3 Planta de henequén (A), Proceso de obtención de la fibra de henequén (B) y Fibras extraídas (C)	12
Figura 1. 4 Bagazo de henequén. A) Pulpa, B) Fibras del bagazo de henequén	13
Figura 1. 5 Materiales compuestos, a) reforzado con fibras cortas, b) reforzado con fibras continuas, c) reforzadas con fibras cortas discontinuas distribuidos en forma aleatoria o alineadas.....	17
Figura 1. 6 Esquema de las características de la interfase fibra-matriz	17
Figura 1.7 Proceso de extrusión.....	21
Figura 1. 8 Esquema del moldeo por compresión.....	22
Figura 1. 9 Esquema del proceso de inyección de plásticos.....	23
Figura 2. 1 Proceso seguido para el desarrollo de este proyecto	26
Figura 2. 2 Colecta de bagazo de henequén. A) sitio de disposición o bagacera y B) bagazo fresco	27
Figura 2. 3 Componentes del bagazo de henequén. A) Fracción fibrosa, B) Fracción no fibrosa.	27
Figura 2. 4 Molino Pagani 1520 con cribas de 4 y 2 mm (A) y molino Brabender con criba de 1 mm (B)	28
Figura 2. 5 Obtención de extraíbles con solventes orgánicos. A) Extractor Soxhlet y B) evaporador rotatorio IKA RV 10.....	30
Figura 2. 6 Sistema para la extracción con agua.....	30
Figura 2. 7 Máquina de pruebas universales marca Instron modelo 1125 con mordazas para fibras	32
Figura 2. 8 Obtención de las láminas de material compuesto en el extrusor doble husillo.....	34
Figura 2. 9 Probetas tipo IV de materiales compuestos fibra-PP	35
Figura 2. 10 Dado formador del perfil (sistema de inyección modificado).....	36
Figura 2. 11 La flecha indica la dirección de flujo de extrusión donde se tomaron las muestras para la caracterización morfológica.	36
Figura 2.12 Representación esquemática del método de flexión a tres puntos.	37
Figura 3. 1 Fotografías del bagazo de henequén (a) y de las fracciones fibrosas (b)	39
Figura 3. 2 Micrografías SEM de fibras del bagazo de henequén. A) Y B) vista de sección	

transversal, C) y D) vista de superficie longitudinal	40
Figura 3. 3 Micrografías SEM de las partes no fibrosas del bagazo de henequén. Cutícula (A, B, C); parénquima (D, E, F)	40
Figura 3. 4 Termogramas de TGA (A) y DTGA (B) de las fracciones obtenidas del bagazo	42
Figura 3.5 Curva Esfuerzo-Deformación de las fibras obtenidas del bagazo de henequén.	44
Figura 3. 6 Termograma de TGA y DTGA del PP y de los materiales compuestos con fibras de 8 mm de longitud promedio y diferentes contenidos de fibra	44
Figura 3. 7 Curvas típicas de esfuerzo-deformación de materiales compuestos en la dirección paralela a la extrusión.	45
Figura 3. 8 Micrografías SEM de los perfiles de materiales compuestos con fibra de 2 mm de longitud promedio y diferente contenidos de fibra. Izq. Corte sección transversal y der. Corte longitudinal.	50
Figura 3. 9 Efecto de la longitud promedio sobre la viscosidad compleja a diferentes concentraciones de fibra.	52
Figura 3. 10 Efecto de la longitud promedio sobre el módulo de almacenamiento a diferentes concentraciones de fibra.	53
Figura 3. 11 Efecto de la longitud promedio sobre el módulo de pérdida a diferentes concentraciones de fibra.	54
Figura 3. 12 Perfil rectangular de PP y del material compuesto con fibras de bagazo de henequén y matriz de PP	55
Figura 3. 13 Micrografía de SEM de la sección transversal (izquierda) y longitudinal (derecha) de los perfiles rectangulares.....	56
Figura 3. 14 Efecto de la longitud de fibra sobre las curvas de DSC de los materiales compuestos.....	57
Figura 3. 15 Probetas elaboradas para los ensayos a flexión.....	58
Figura 3. 16 Curvas esfuerzo-deformación de las pruebas de flexión de los perfiles rectangulares con 20% de fibras	59

Resumen

El continuo avance tecnológico demanda materiales cada vez más resistentes, duraderos, livianos y amigables con el medio ambiente. Los materiales compuestos reforzados con fibras naturales representan una opción atractiva para satisfacer estas demandas, sobre todo cuando las fibras son recuperadas de residuos agroindustriales. En este trabajo, se evaluó el uso de las fibras recuperadas del bagazo de henequén, un cultivo de gran importancia para el estado de Yucatán, que es el residuo generado en la obtención de fibras de henequén. La parte fibrosa y no fibrosa del bagazo se caracterizaron mediante la determinación de su composición química, propiedades térmicas y morfología: adicionalmente se determinaron las propiedades mecánicas de las fibras. Ambas fracciones presentaron altos contenidos de holocelulosa y bajos contenidos de lignina en comparación con las fibras de madera, con una estabilidad térmica hasta temperaturas de 200 °C. Se determinó el efecto de la longitud y del contenido de fibra sobre las propiedades mecánicas y reológicas de los materiales compuestos. Los materiales compuestos se obtuvieron usando un extrusor doble husillo y un dado formador de lámina de 3 mm de espesor, de donde se cortaron las probetas para las pruebas de caracterización. Aunque no se observó una gran diferencia en los valores de los parámetros mecánicos (módulo, resistencia y deformación) a tensión de los materiales obtenidos con diferentes contenidos y dimensiones de fibras; un análisis ANOVA de los resultados, mostró que el contenido de fibra fue significativo para los valores de módulo y de deformación última de los materiales compuestos. Se observó el efecto de la longitud de la fibra en las propiedades mecánicas a flexión, obteniendo los valores más altos de módulo y resistencia a flexión cuando se usaron fibras con 8 mm de longitud

Abstract

Continuous technological progress demands materials that are increasingly resistant, durable, lightweight and environmentally friendly. Composite materials reinforced with natural fibers represent an attractive option to meet these demands, especially when the fibers are recovered from agro-industrial waste. In this work, the use of fibers recovered from henequen bagasse, a crop of great importance for the state of Yucatan, which is the residue generated in the production of henequen fibers, was evaluated. The fibrous and non-fibrous parts of the bagasse were characterized by determining their chemical composition, thermal properties and morphology; additionally, the mechanical properties of the fibers were determined. Both fractions presented high holocellulose contents and low lignin contents compared to wood fibers, with thermal stability up to temperatures of 200 °C. The effect of fiber length and fiber content on the mechanical and rheological properties of the composites was determined. The composites were obtained using a twin-screw extruder and a 3 mm thick sheet-forming die, from which the specimens were cut for characterization tests. Although no great difference was observed in the values of the mechanical parameters (modulus, strength and deformation) in tension of the materials obtained with different fiber contents and dimensions; an ANOVA analysis of the results showed that the fiber content was significant for the values of modulus and ultimate deformation of the composite materials. The effect of fiber length on the flexural mechanical properties was observed, obtaining the highest values of modulus and flexural strength when fibers with 8 mm length were used.

Introducción.

En los últimos años, se ha observado un incremento en la investigación sobre el aprovechamiento de residuos agroindustriales en la obtención de productos químicos, generación de energía, obtención de fibras naturales y materiales compuestos [1-6], como una forma de darles un valor agregado a dichos residuos y reducir la contaminación que se genera durante su descomposición. Por lo general, los residuos son acumulados, conforme se obtienen, en la cercanía de las agroindustrias en vertederos a cielo abierto donde se mantienen sin ningún tratamiento. La degradación biológica o térmica de estos residuos genera componentes tales como el CO₂, CH₄ y lixiviados que causan contaminación del suelo, del manto freático y del aire [7-9]. En el proceso de desfibrado o «raspa» de las hojas de henequén (*Agave fourcroydes*) para la obtención de fibras se generan como residuos el bagazo y jugo de henequén.

El bagazo de henequén está constituido por un componente fibroso o fibra y un componente no fibroso o pulpa, en la proporción 25:75. Las fibras son las obtenidas por la ruptura de las fibras largas durante el proceso de desfibrado, mientras que la pulpa es la cutícula y parénquima presentes en las hojas de henequén [10]. A diferencia de otros residuos agroindustriales como el bagazo de caña, el bagazo de henequén está disponible todo el año, aunque se obtienen una mayor producción en los meses de noviembre a abril. El henequén se cultiva en los estados de Yucatán y Tamaulipas, siendo el Estado de Yucatán el que tiene la mayor superficie cultivada y la mayor producción de fibra. En 2017 se reportó que se tenía un total de 8,679 ha de superficie sembrada, de las cuales 5,945 ha fueron cosechadas y se tuvo una producción de 4,992 toneladas de fibra en 39 municipios de Yucatán [11]. Se ha reportado que de un millar de hojas de henequén se obtienen de 23-24 kg de fibra larga, 4.1-4.8 kg de fibra corta y de 100-200 kg de bagazo [12].

Las fibras de henequén y las obtenidas del bagazo, al igual que todas las fibras naturales, son propiamente un material compuesto, ya que están constituidas por microfibrillas de celulosa en una matriz de lignina y hemicelulosa. Las microfibrillas de celulosa están distribuidas a lo largo de la fibra. Los enlaces de hidrógeno y otros tipos de enlaces entre los componentes de las fibras proveen la resistencia y la rigidez necesaria a la misma, para actuar como un refuerzo de matrices poliméricas y cementicias [13-16]. El aprovechamiento de las fibras del bagazo de henequén a nivel industrial, en la obtención de materiales compuestos y la generación de productos con estos materiales, representa una alternativa

para complementar la economía de los productores y de las desfibradoras de henequén; sin embargo, en los últimos años el aprovechamiento del bagazo de henequén se ha centrado más en el uso de la pulpa para la alimentación animal y del bagazo como sustrato para el cultivo de plantas. Los trabajos en la literatura, se han centrado en el aprovechamiento de la fibra larga obtenida de la hoja de henequén y se tiene poca información sobre el uso de las fibras obtenidas del bagazo en la obtención de materiales compuestos, celulosa u otros productos [17-19]. Por otro lado, las industrias actuales requieren materiales con propiedades atractivas, como por ejemplo mecánicas, químicas y térmicas, pero al mismo tiempo más sustentables. El uso de los residuos agroindustriales, como fuente renovable de materiales lignocelulósicos, es una buena alternativa para la obtención de nuevos materiales con propiedades similares a los sintéticos, pero con una mayor sustentabilidad al provenir de fuentes renovables [20-21].

En este trabajo, se determinó la composición del bagazo de henequén, así como las propiedades mecánicas y térmicas de las fracciones fibrosa y no fibrosa. Se evaluó el efecto del tamaño de las fibras sobre las propiedades mecánicas de los materiales compuestos con matriz de polipropileno y en la obtención de perfiles rectangulares.

La estructura del trabajo es la siguiente:

En el capítulo 1 se describe que es un residuo agroindustrial, las fuentes de generación, su composición química y la manera en que pueden ser tratados para resolver problemas ambientales y utilizarlos en la obtención de materiales compuestos. Se describen los materiales compuestos fibro-reforzados con matriz termoplástica y las diferentes formas de procesarlos para la obtención de productos finales.

En el capítulo 2 se describe la parte experimental, que consta de las siguientes secciones: obtención y caracterización de las fibras del bagazo, mediante la determinación de sus propiedades térmicas; obtención de materiales compuestos con las fibras y polipropileno mediante el proceso de extrusión y la evaluación del efecto del contenido y longitud de fibras sobre las propiedades mecánicas de los materiales; obtención de los perfiles rectangulares 2.5 cm x 5 cm de espesor y su ancho, respectivamente, con 50 cm de largo y su caracterización mediante la determinación de propiedades mecánicas a flexión.

En el capítulo 3 se presentan los resultados obtenidos tanto de la caracterización del bagazo de henequén, de los materiales compuestos y de los perfiles obtenidos en este trabajo.

Finalmente, se presentan las conclusiones del trabajo y la bibliografía más relevante del mismo.

Capítulo 1: Antecedentes

1.1 Residuos Orgánicos

De acuerdo a Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos en México [11], un residuo es el “material o producto cuyo propietario desecha y que puede ser susceptible de ser valorizado o someterse a tratamiento o disposición final conforme a lo previsto en la misma ley”. Aunque estos criterios son principalmente aplicados a los residuos sólidos urbanos, este marco referencial permite enunciar que los residuos orgánicos son productos sólidos, semisólidos o líquidos, generados a partir del uso directo de productos primarios o de su industrialización, no útiles para el proceso que los generó, pero si susceptibles de un aprovechamiento o transformación que genere otro producto con valor económico, de interés comercial y/o social [22].

En la tabla 1.1 se muestran algunas fuentes de generación de los residuos orgánicos más comunes que existen y su clasificación de acuerdo al sector económico o fuente de generación [23].

Tabla 1. 1 Tipos de residuos orgánicos y sus características.

Tipos de residuos orgánicos	Componentes de los residuos	Características físicas del residuo
Residuos agropecuarios	Estiércol	Sólido muy húmedo (%h > 55)
	Cascaras, hojas, tallos, maleza y pastos	Sólido con bajo contenido de humedad (%h<55);
Residuos forestales	Cortezas, raíces y ramas, aserrín, virutas	Sólido con bajo contenido de humedad (%h<55);
Residuos urbanos	Desechos orgánicos de poda, jardines o de alimentos	Sólido muy húmedo (%h > 55)
	Grasas y aceites vegetales	Líquido o semisólido
Residuos Agroindustriales	Cascara y pulpa de frutas, bagazos,	Sólido con alto contenido de humedad (%h>55)
	Aguas provenientes del procesado de vegetales, plantas y carne	Líquido con contenidos de sólidos del 10-20%.

Los residuos agropecuarios son aquellos residuos orgánicos que se producen en el sector agrícola, ganadero o pecuario y consisten tanto de excrementos de animales (estiércol), cáscaras de frutos, hojas y tallos de cultivos agrícolas, así como las malezas y pastos. La principal característica es que son sólidos muy húmedos, con contenidos de humedad del orden del 55% o mayor. Los residuos forestales son las raíces y ramas de los árboles que se dejan en los bosques, así como los residuos generados en su aprovechamiento tanto en el sector maderero (aserrín, virutas) o del papel (cortezas). Los residuos urbanos orgánicos provienen de las podas de árboles, de jardines o son residuos de alimentos, los cuales se manejan en la corriente de residuos sólidos urbanos. En esta categoría se incluyen también los aceites y grasas producto de la cocción de alimentos.

Los residuos agroindustriales son los generados en la transformación de materias primas como los productos agrícolas y pecuarios en productos de valor agregado, generado al mismo tiempo ingreso y oportunidades de empleo, así como una contribución al desarrollo económico global. Los residuos agroindustriales pueden ser líquidos o sólidos. Bajo la denominación de residuos sólidos se agrupan los residuos que se pueden manejar como sólidos, aunque presenten alto contenido de humedad como las cáscaras y pulpas de frutas, bagazos, etc. Por otro lado, los residuos líquidos se manejan y transportan como líquidos, aunque pueden tener un alto contenido de materia orgánica disuelta o en suspensión, como las vinazas obtenidas de la producción de alcohol a partir de agaves o caña de azúcar.

1.1.1 Fuentes de generación de residuos agroindustriales en México

Los residuos agroindustriales provienen de dos tipos de agroindustria: la alimentaria y la no alimentaria. La primera de ellas comprende la transformación de materia prima proveniente del sector agrícola, pecuario, acuícola y forestal, dirigido exclusivamente a la obtención de alimentos, mientras que, la segunda se encarga de la transformación de productos del campo a productos como maderas, flores, tabaco, fibras, colorantes, entre otros.

En la tabla 1.2 se muestra algunos ejemplos de fuentes de producción de residuos agroindustriales. Así, la industria de licores genera residuos sólidos como los bagazos de agave y líquidos como las vinazas que son residuos generados en la producción de alcohol; en las agroindustrias procesadoras de frutas se producen cáscaras y bagazo proveniente del prensado de las frutas; en la industria de la caña de azúcar se generan esquilmos, bagazo de caña y cachaza; los desechos cítricos consisten en bagazo y cáscaras, etc.

Tabla 1. 2 Algunas fuentes de generación de residuos agroindustriales

Tipo de agroindustria	Tipos de residuos
Producción de aceite de coco u otras palmas	<ul style="list-style-type: none"> • Mesocarpio fibroso del fruto • Endocarpio rígido • Pulpa extraída
Producción de azúcar	<ul style="list-style-type: none"> • Esquilmos de la caña • Bagazo de caña • Cachaza
Licores de agaves	<ul style="list-style-type: none"> • Bagazo de agave • Vinazas
Jugos de frutas o de cítricos	<ul style="list-style-type: none"> • Cáscaras • Bagazo

La composición química de los residuos agroindustriales varía dependiendo del proceso productivo y de la materia prima utilizada; sin embargo, la mayoría de los residuos agroindustriales sólidos son por lo general materiales lignocelulósicos, denominado así debido a que los componentes mayoritarios son la celulosa, hemicelulosa y lignina. Sin embargo, la relación entre estos componentes no es la misma para los diferentes residuos. Además de estos componentes, los residuos presentan, como se muestra en la tabla 1.3, minerales (cuantificado como cenizas) y compuestos extraíbles en solventes orgánicos o en agua.

Tabla 1. 3 Composición de cenizas y extractivos

Residuo agroindustrial	Cenizas (%)	Extractivos (%)	Lignina (%)	Holocelulosa (%)	Referencias
Cáscara de coco	6.89 ± 0.02	14.70 ± 0.51	42.30 ± 1.03	34.4 ± 1.5	[24]
Bagazo de caña	4.00 ± 0.02	1.70 ± 0.35	30 ± 0.56	60.3 ± 1.3	[24]
Esquilmos de caña	6.99 ± 0.02	9.28 ± 0.23	19.70 ± 0.23	61.1 ± 0.1	[24]
Bagazo de agave	6.00 ± 0.04	16.7 ± 0.36	17.8 ± 0.3	65.4 ± 1.2	[25]
Bagazo de cítricos	2.87 ± 0.7	4.33 ± 0.23	1.7 ± 0.2	29.7 ± 1.4	[26]

Estos componentes pueden afectar los procesos para el aprovechamiento de los residuos. Se ha reportado que elevadas concentraciones de cenizas pueden provocar un aumento de pH durante la hidrólisis ácida o el pretratamiento de los residuos, para la obtención de azúcares de la celulosa y hemicelulosa, siendo necesario usar temperaturas más altas y tiempos más largos para lograr altas conversiones.

Se conoce como extraíbles a un grupo de compuestos orgánicos e inorgánicos presentes en los residuos. En los compuestos orgánicos extraíbles se incluyen, entre otros, moléculas hidrocarbonadas alifáticas y aromáticas, alcoholes, fenoles, aldehídos, cetonas, ácidos alifáticos, ceras, glicéridos y compuestos nitrogenados [27]. Los residuos provenientes del procesado de frutas son ricos en compuestos fenólicos, especialmente pigmentos antociánicos que poseen actividad antioxidante. Los residuos de cítricos, mango, banano, uva, tomate, zanahoria y remolacha presentan en su composición ingredientes con actividad biológica.

Algunos residuos líquidos, como el jugo de henequén, las aguas de la etapa de lavado y de procesamiento de frutas y hortalizas, etc. presentan sólidos solubles o suspendidos de carbohidratos, moléculas orgánicas pequeñas y minerales. Por otro lado, las agroindustrias procesadoras de carnes y pescado generan líquidos con altos contenidos de proteínas y grasas, con altos valores de DBO (demanda biológica de oxígeno) de hasta 8,000 mg/L.

La acumulación de residuos agroindustriales sólidos, líquidos y de los gases contaminantes producto de su descomposición, constituyen focos potenciales de contaminación y riesgo para la salud, siendo necesario una adecuada disposición final o desarrollar procesos que reduzcan la cantidad de residuos que se desechan. La generación de estos residuos puede ocurrir durante los procesos relacionados con el cultivo u obtención de materia prima o en las actividades de procesamiento de ésta. Estos residuos producen diversos impactos ambientales adversos, como contaminación principalmente del suelo y el agua, tanto en fuentes superficiales como subterráneas [28].

Algunos de estos residuos, sobre todo los que quedan en los campos de cultivos, como los de la caña de azúcar, son quemados, lo que produce una gran liberación de dióxido de carbono (CO_2); otros como los generados en la obtención de aceite de palma o en la industria láctea, son depositados en vertederos controlados y su descomposición anaeróbica resulta en producción de gases de efecto invernadero como el metano, así como la emisión de olores no agradables. Algunos son depositados en vertederos a cielo abierto, lo que resulta en la contaminación de cursos de aguas, molestias por presencia de

olores, proliferación de ratas, moscas y otros insectos, entre otros efectos negativos.

Sin embargo, la valorización de los residuos agroindustriales mediante su aprovechamiento en la generación de productos de valor agregado, puede resultar en un desarrollo económico de la región. Los residuos pueden ser una fuente renovable para la producción de composta y de alimentos para animales; la producción de fibras naturales como las de coco, bagazo de agave, etc.; es posible producir biocombustibles, enzimas, compuestos antioxidantes, pigmentos, carotenoides, fibra dietética, nutraceuticos, aceites microbianos, proteína unicelular, nanopartículas y plásticos biodegradables [29].

1.1.2 Residuos lignocelulósicos y fibras naturales

Los residuos lignocelulósicos están constituidos principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina. Los dos primeros compuestos son polisacáridos, es decir, están constituidos por unidades de azúcares mientras que la lignina es un polímero altamente aromático. La estructura de estos componentes se muestra en la Figura 1.1 y se describen a continuación:

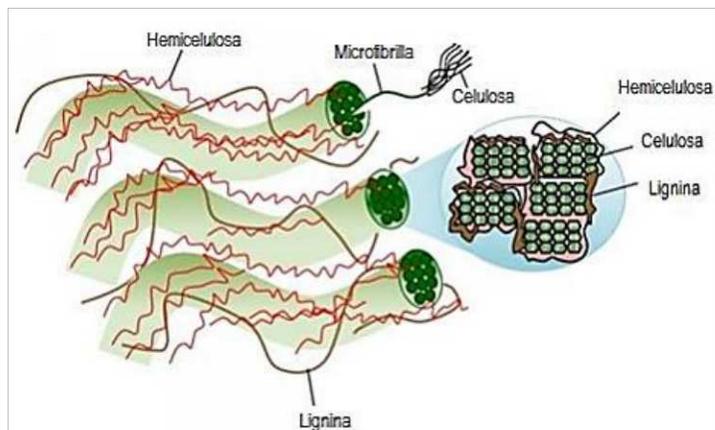


Figura 1. 1 Principales biopolímeros que conforman los residuos lignocelulósicos [30].

- ❖ Celulosa. Es un polisacárido de muy alto peso molecular, cuya estructura base son unidades de anhidroglucosa unidas mediante enlaces 1,4- β -glucosídicos. Las cadenas de celulosa están organizadas en zonas ordenadas (cristalinas) rodeadas de zonas amorfas que conforman las fibras de celulosa. La presencia de tres grupos OH en cada una de las unidades estructurales, le permite la modificación de estos grupos en grupos éster o éter [30].
- ❖ Hemicelulosa. Es un polisacárido de bajo peso molecular que contiene diferentes unidades de azúcares como glucosa, xilosa, galactosa y arabinosa en su cadena

principal. Es un polímero amorfo y ramificado, junto con la lignina funciona como matriz que mantiene juntas las fibras de celulosa [31].

- ❖ Lignina. Es una molécula altamente aromática y entrecruzada, con una estructura repetitiva de fenilpropano. Debido a que en su biosíntesis participan tres alcoholes fenilpropílicos (alcoholes cumarílico, sinapílico y coniferílico), los radicales se acoplan de manera aleatoria dando origen a una estructura tridimensional, esto es altamente entrecruzada dando como resultado un polímero amorfo. Los anillos aromáticos de la lignina están unidos entre ellos por anillos de furano o enlaces éter [27].

Los residuos lignocelulósicos se pueden considerar un material compuesto natural de tipo jerárquico, ya que como se puede observar en la Figura 1.2, la pared celular de las células vegetales está formada por fibrillas de celulosa, con diámetros del orden de micras, embebidas en una matriz de lignina y hemicelulosa. A su vez, las fibrillas de celulosa están conformadas por microfibrillas de celulosa (con diámetros del orden de nanómetros), las cuales a su vez están formadas por cadenas de celulosa ordenadas (zona cristalina) y amorfas [32].

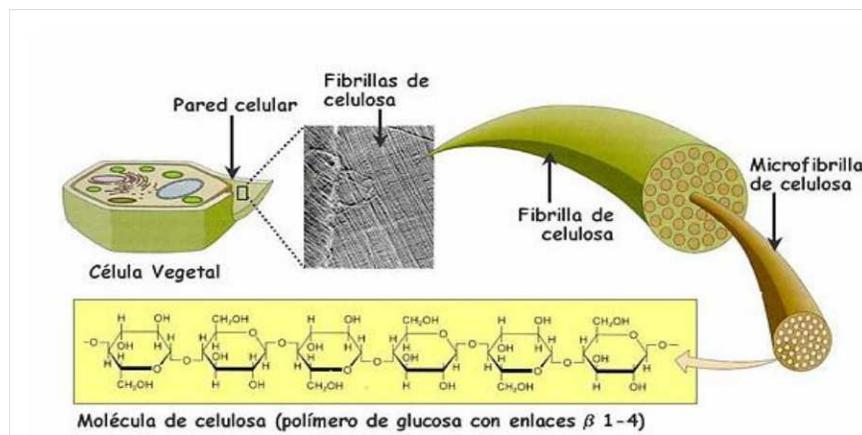


Figura 1. 2 Estructura de la pared celular de la célula vegetal [32].

Los residuos agroindustriales pueden ser una fuente de fibras naturales, ya que en muchos de ellos como los bagazos obtenidos de la piña de agave o del bagazo del henequén, están formados por un componente fibroso (con fibras de 10-40 cm de longitud y diámetros de 200-500 micras) y no fibroso. Ambos materiales también pueden ser una fuente de fibras de celulosa, ya que tienen contenidos de celulosa del orden del 50-70% que son más altos que el contenido de celulosa en la madera que es del orden del 40%.

El incremento del uso de fibras naturales, provenientes de residuos agroindustriales, para la obtención de materiales compuestos fibroreforzados de matriz termoplástica o termofija, se debe a sus características físicas, químicas y a que provienen de fuentes renovables. Las fibras naturales no son tóxicas ni perjudiciales a la salud, tienen baja densidad, es una materia prima biodegradable, las fibras no fracturan durante su procesamiento como ocurre con otras fibras rígidas, y presentan un bajo consumo de energía durante su procesamiento. Además, su uso contribuye a la creación y multiplicación de empresas rurales, fomenta la economía de la región, ya que algunos cultivos se pueden sembrar en zonas áridas y semidesérticas, etc. [33,34]. Las fibras naturales también se han usado en la industria de la construcción, para la obtención de concretos fibroreforzados, ya que las fibras evitan las fracturas tempranas del cemento cuando termina de curarse.

1.2 Residuos de la industria henequenera

El henequén (*Agave fourcroydes*) es una planta del género de los agaves, perteneciente a la familia "Agavaceae". Es originario del estado de Yucatán, y en la época prehispánica, los mayas lo llamaban "Ki", en su lengua materna. De esta planta se obtiene la fibra que se emplea en la industria textil, conocida localmente como fibra de henequén. Mundialmente, la fibra obtenida de agave es conocida como "sisal", en alusión al puerto yucateco de donde se exportaba el henequén hacia los diferentes destinos [35]. Sin embargo, el agave utilizado es una variedad conocida como *Agave sisalana* cuyo origen es el henequén sembrado en Yucatán. El henequén, es una planta que tiene un uso amplio, debido que contribuye a la preservación del paisaje y la erosión del suelo, pero su mayor importancia económica está en la utilización de las hojas como fuente de fibras duras [36]. La fibra de henequén o de sisal se puede emplear en la fabricación de cuerdas, hilos, sacos, mecates, entre otros productos. También se utiliza para elaborar artesanías como bolsas, tapetes, zapatos, alfombras y hamacas. En los últimos años se ha explorado su uso en la obtención de materiales compuestos, celulosa y nanocelulosa [37,38].

El henequén se puede cultivar en casi todos los tipos de suelos, excepto en aquellos que son húmedos, salinos o arcillosos. El henequén es una planta de unos 2 metros de alto resistente a la sequía, el tiempo para poder cortar las hojas es aproximadamente de 5 a 6 años con un periodo de producción de hasta 30 años, si el terreno donde se ubica se encuentra libre de vegetación, ya que la sombra adelgaza las hojas disminuyendo el

rendimiento de fibras. Cumplido el tiempo de la producción de las hojas, el tronco del henequén queda en la plantación hasta la siembra de una nueva planta. El tronco seco suele utilizarse en las comunidades rurales para encender el fogón usado en la cocción de alimentos. Para su aprovechamiento en la producción de fibras, las hojas se cortan y se agrupan en lotes de 40 hojas para su traslado a las desfibradoras, en donde se obtienen las fibras de henequén usando una desfibradora automática. La máquina desfibradora consta de 2 tamboras con cuchillas que golpean la hoja, a una determinada velocidad, que permite la separación de las fibras de la penca, obteniendo fibras largas de hasta 130 cm de longitud (Figura 1.3). Los modelos de desfibradoras más usadas son la Corona, el Robey y el Stark Kirby. En el proceso de desfibrado, se generan como residuos el bagazo y jugo de henequén. El bagazo está compuesto de materiales lignocelulósicos en forma de fibras, así como un componente no fibroso formado por la cutícula, parénquima y otros componentes de la pared celular. El jugo del bagazo de henequén contiene cantidades pequeñas de fósforo, calcio y proteína cruda, así como otras moléculas orgánicas. Ambos residuos se colectan en vagones y son transportados del sitio de desfibrado hacia espacios abiertos conocidos como bagaceras, en donde permanecen hasta su descomposición o su venta como alimento para ganado, cultivo de hortalizas, etc.



Figura 1. 3 Planta de henequén (A), Proceso de obtención de la fibra de henequén (B) y Fibras extraídas (C)

El bagazo está compuesto principalmente por polisacáridos (celulosa y hemicelulosa) que representan entre 75 % y 80 % del peso seco, por lo que los microorganismos aeróbicos o anaeróbicos del suelo iniciarán su degradación hacia moléculas más pequeñas. Debido a que el bagazo se acumula en la bagacera, se favorece la degradación por medio de bacterias anaerobias, y los azúcares son convertidos a ácido sulfhídrico (H₂S) y en metano

(CH₄), los que además de producir malos olores son gases de efecto invernadero, por lo que generan contaminación ambiental. Durante la descomposición también se generan lixiviados que junto con el jugo de henequén se infiltran en el subsuelo y causan contaminación de los mantos acuíferos subterráneos.

En la figura 1.4 se puede observar que del bagazo de henequén se puede separar en dos componentes: una fracción no fibrosa (Figura 1.4A) conocida como pulpa y que consiste principalmente de cutícula y otros componentes de las hojas, y la fracción fibrosa (Figura 1.4B) que son las fibras que se rompieron durante el proceso de desfibrado.

A las fibras recuperadas del bagazo de henequén se le pueden dar un valor agregado mediante su uso en la obtención de materiales compuestos o de celulosa. Se ha reportado que la pulpa de henequén tiene bajo valor nutricional, pero presenta alta digestibilidad y es rica en inulina, la cual se considera una de las sustancias prebióticas más importantes [39], por lo que se utiliza en la alimentación animal.



Figura 1. 4 Bagazo de henequén. A) Pulpa, B) Fibras del bagazo de henequén

1.3 Materiales compuestos

Los materiales compuestos están formados por al menos dos fases constitutivas y su comportamiento global, depende de las propiedades de las fases constituyentes y de la forma en las que interactúan estos componentes. Es decir, estos materiales se forman mediante la conjunción de al menos dos de sus constituyentes, una fase continua denominada matriz y otra fase discontinua o dispersa que se denomina refuerzo o carga dependiendo de su efecto en las propiedades mecánicas [40,41].

Los materiales compuestos se pueden clasificar dependiendo del tipo de matriz usada o de la forma de la fase discontinua (ver Tabla 1.4). La matriz puede ser metálica, cerámica o polimérica. En el caso de matriz polimérica, ésta puede ser termoplástica, termofija o elastomérica. La función de la matriz es la de actuar como ligante de la fase dispersa y transferir las cargas a esta. Por lo general, la fase dispersa es más rígida que la matriz y se observa un incremento en el módulo elástico del material compuesto con respecto al de la matriz, en este caso la fase dispersa actúa como reforzante [42].

Tabla 1. 4 Clasificación de los materiales compuestos dependiendo de la matriz o de la forma de la fase dispersa

Tipo de matriz	Metálicas	Aluminio, acero, bronce
	Cerámicas	Carburo de silicio, alúmina, aluminosilicatos (mulita)
	Poliméricas	Resinas termoplásticas (HDPE, PP, etc), resina termofijas (epoxi, poliéster, etc.), elastoméricas (hule natural o sintético, poliuretanos, etc.)
Tipos de fase dispersa	Particulados	Concreto, aleaciones de aluminio reforzadas con carburo de silicio, HDPE cargado con carbonato de calcio
	Fibro-reforzados	Poliuretanos con fibras de yute, polietileno con fibras de coco, resina epoxi con fibras de carbono

En el caso contrario, esto es, cuando la fase dispersa tiene un menor módulo o no se observa un aumento en el módulo del material compuesto, la fase dispersa actúa como una carga o relleno [43]. En los materiales compuestos particulados, la fase dispersa o partículas tienen al menos dos de sus dimensiones del mismo orden de magnitud, pueden ser irregulares, esféricas o en forma de plaquetas. En los materiales compuestos fibro-reforzados, cuando las fibras presentan una alta relación longitud/diámetro se favorece la transferencia de cargas de la matriz hacia las fibras, por lo que éstas últimas actúan como agentes reforzantes [44].

Las fibras Pueden ser continuas (largas), pueden estar entretejidas o no tejidas para formar textiles.

Los materiales compuestos estructurales son una combinación de materiales homogéneos y materiales compuestos, en los cuales las propiedades de estos materiales no dependen sólo de los constituyentes (fase dispersa y fase continua) sino también de la geometría del diseño de los elementos estructurales. Los compuestos estructurales se clasifican en: compuestos laminares, estructuras tipo sándwich y estructuras no-laminares. La zona de unión entre la fase dispersa y la matriz que se forma durante el proceso de obtención del material compuesto, tiene una influencia fundamental en las propiedades mecánicas del material, ya que favorece o restringe la transferencia de esfuerzos de la matriz hacia la fase reforzante [45].

Uno de los materiales más empleados para el desarrollo de materiales compuestos son los polímeros, los que pueden ser utilizados tanto como matriz o como refuerzo. Esto es debido a su fácil producción y propiedades adecuadas para ambas aplicaciones. Por ejemplo, pueden ser procesados a bajas temperaturas en comparación cuando se usa una matriz metálica, además no se requiere tecnología compleja para su obtención, ya que se pueden usar los mismos procesos de la industria de los termoplásticos (extrusión, compresión, inyección, etc.) o de los termofijos [45]. Los materiales compuestos de matriz polimérica presentan características que no presentan los componentes en forma separada. Algunas características que presentan los productos hechos usando polímeros en la obtención materiales compuestos son [45]:

- ❖ **Alta resistencia:** Los materiales compuestos con polímeros (como matriz y/o como refuerzo) presentan alta resistencia en relación a su peso, debido a la baja densidad de los polímeros.
- ❖ **Baja densidad:** La densidad de los polímeros es menor que la de los metales y cerámicos
- ❖ **Flexibilidad de formas:** Debido a la gran variedad de métodos, matrices y tipos de refuerzos (o cargas), los materiales compuestos se pueden obtener en una gran variedad de formas y acabados.
- ❖ **Alta resistencia dieléctrica:** Los materiales compuestos a base de polímeros son aislantes eléctricos.
- ❖ **Gran capacidad de consolidación de partes:** Los materiales compuestos permiten la obtención de componentes para su ensamblado, reduciendo así el

número de elementos y por lo tanto, necesitando menor número de uniones.

- ❖ **Resistencia a la corrosión:** Se puede seleccionar matrices con resistencia a cualquier medio corrosivo.
- ❖ **Comportamiento a fatiga:** Los polímeros al ser materiales semicristalinos o amorfos, no presentan una estructura completamente ordenada y rígida como los metales, por lo que su resistencia a la fatiga es mayor que la de los metales.

1.3.1 Materiales compuestos fibro-reforzado

Los materiales compuestos fibro-reforzados se han desarrollado rápidamente durante los últimos años debido a su versatilidad y al número de áreas de uso, por lo que el desarrollo de estos materiales ha aumentado constantemente. Estos materiales pueden proporcionar un alto rendimiento, menores costos, bajo peso y además el cumplimiento de normas ambientales y de seguridad, lo que los hacen atractivos para las necesidades actuales en industrias como la automotriz, aeronáutica, entre otras [46]. Las fibras pueden ser: fibras naturales (celulosa, algodón, yute, henequén, agave, etc.), fibras sintéticas (poliéster, nylon, dacrón, etc.) o fibras de origen mineral (carbono, grafito, boro, tungsteno) [17,19]. Los factores a considerar en el diseño de un material compuesto reforzado con fibras son la razón de aspecto (relación longitud/diámetro), el porcentaje de fibras, su orientación, así como la interacción fibra-matriz [47]. Un refuerzo fibroso no solo se caracteriza por su geometría, sino, también por su razón longitud-diámetro. En la fabricación de materiales compuestos fibroreforzados se usan fibras cortas (discontinuas) fibras largas (continuas) (Figura 1.5 a y b). La orientación de las fibras discontinuas puede ser aleatoria o preferencial en una dirección (Figura 1.15c). En el caso de las fibras continuas, la orientación frecuentemente es unidireccional y la obtención de una orientación aleatoria, puede ser aproximada usando un refuerzo de tejido bidireccional en la obtención del material compuesto mediante capas en las que se varía la dirección de fibras de una capa con respecto a la otra.

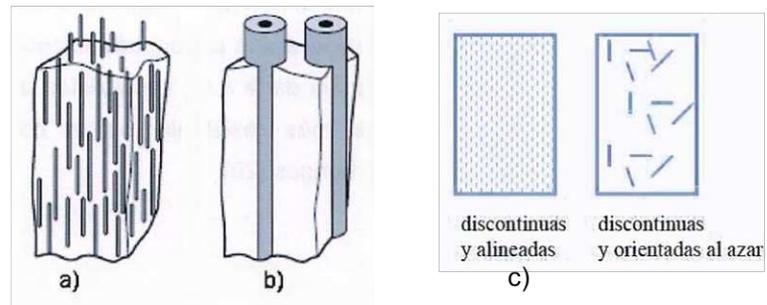


Figura 1. 5 Materiales compuestos, a) reforzado con fibras cortas, b) reforzado con fibras continuas, c) reforzadas con fibras cortas discontinuas distribuidos en forma aleatoria o alineadas [47].

En los materiales compuestos con refuerzo de fibras, ambas fases retienen sus identidades físicas y químicas; sin embargo, se tiene una combinación de propiedades que no pueden ser logradas con la actuación de los constituyentes solos y que se debe a la presencia de una interface entre los dos constituyentes. Diversos autores [44,48] han propuesto la existencia de esta región formada por la unión entre la fibra y la matriz, la cual tiene una morfología y composición química diferente a ambos materiales.

Esta región, referida como la interface (como se ilustra en la Figura 1.6), se define como una región de composición química variable, donde tiene lugar la unión entre la matriz y el

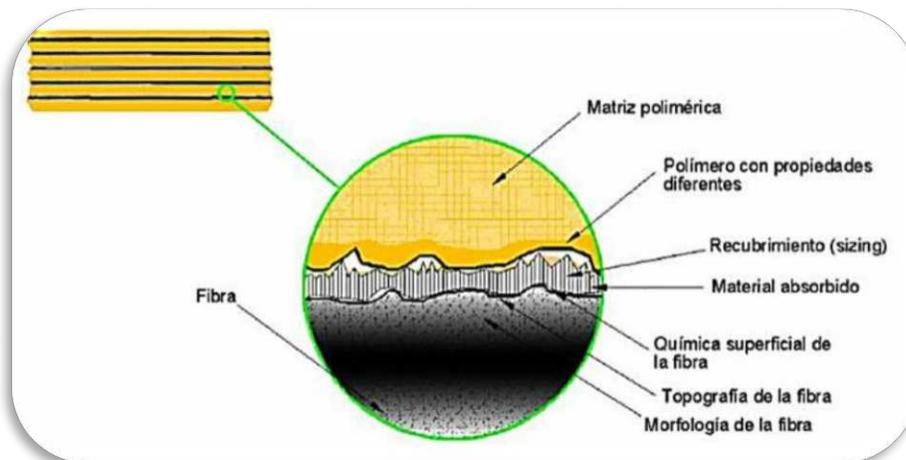


Figura 1.6 Esquema de las características de la interfase fibra-matriz [48].

refuerzo, que asegura la transferencia de las cargas aplicadas entre ambos y condiciona las propiedades mecánicas finales de los materiales compuestos, también incorpora una región de espesor finito que se extiende a ambos lados de la interface fibra y matriz [49].

1.3.2 Materiales compuestos reforzados con fibras naturales

Las fibras naturales pueden ser de origen vegetal, animal o mineral (Tabla 1.5). Las fibras de origen vegetal, también denominadas lignocelulósicas debido a su alto contenido de celulosa y lignina, se obtienen de diversas partes de las plantas: el algodón es obtenido de las semillas, el lino y cáñamo del tallo y las de henequén de las hojas. Las fibras de origen animal se obtienen de glándulas sericígenas de gusano o insecto como en el caso de la seda o de folicos pilosos de mamíferos como la lana. Las fibras de origen animal están constituidas de proteínas. Las fibras de origen mineral son estructuras inorgánicas como el asbesto o amianto. Aunque la principal aplicación de las fibras de origen vegetal o animal es en la obtención de productos textiles, se han explorado otras aplicaciones como en la obtención de materiales compuestos.

Tabla 1. 5 Clasificación, ejemplos y aplicaciones de fibras naturales.

Origen de fibra	Fuente	Ejemplos	Aplicaciones principales
Vegetales (lignocelulósicas)	Semilla	Algodón, Ceiba	Camisas, abrigos, chaquetas.
	Fruto	Coco	Hidroponía
	Tallo	Lino, Cáñamo, Bambú, Yute	Pantalones, faldas.
	Hoja	Henequén	Cuerda, sogas y sacos.
Animales (Proteína)	Glándulas sedosas	Seda	Pañuelos, batas y ropa interior.
	Folicos pilosos	Lana, Angora, Crin	Trajes, mantas y guantes.
Minerales (Inorgánica)	Amianto, mullita, sepiolita		Tableros y objetos prensados.

Las fibras celulósicas han atraído el interés de investigadores y de la industria, debido a que presentan ventajas como, flexibilidad durante su procesamiento, no son dañinas para la salud, es posible su tratamiento químico, son provenientes de fuentes renovables, y tienen bajas densidades [50]. Estas fibras pueden llegar a ser competitivas con respecto a las fibras sintéticas o artificiales, en cuanto a propiedades mecánicas específicas (Tabla 1.6) y

también en cuanto a precio [51]. Por esta razón, se ha estudiado la obtención de materiales compuestos reforzados con fibras naturales y actualmente están siendo utilizadas para el refuerzo de matrices termoplásticas y termoestables [52,53].

Tabla 1.6 Fibras naturales y sus propiedades mecánicas [54]

Fibra natural	Resistencia a la tensión [MPa]	Módulo de Young [GPa]
Lino	450-1100	27.6
Algodón	287-800	5.5-12.6
Yute	393-773	13-26.5
Fique	511-635	9.4-22.0
Fibras de coco	131-175	4.0-6.0

Se ha evaluado un gran número de fibras naturales de origen vegetal en la obtención de materiales compuestos. Se usaron fibras de abacá y cabuya con una matriz fotopolimérica para la obtención de materiales compuestos en 3D [55]. Las fibras de fique [56] se usaron como refuerzo en estudios del efecto del agente de acoplamiento sobre las propiedades mecánicas de los materiales compuestos. Se usaron fibras naturales provenientes de diferentes fuentes (algodón, coco, caña de azúcar) y resina epoxi para la obtención de paneles acústicos con aplicaciones de aislamiento de ruido en edificios [57]; se estudió el efecto del contenido de fibra, y se obtuvo que los materiales con fibras de coco presentaron mayor resistencia a la flexión que los materiales obtenidos con las otras fibras.

1.3.3 Materiales compuestos con fibras de henequén

El henequén es una planta de gran importancia para la economía del estado de Yucatán, ya que se usa en la producción de fibras que son obtenidas de las hojas o pencas de las plantas. Su cultivo ha decaído en los últimos años al ser sustituida la fibra en sus aplicaciones tradicionales (cuerdas, mecate, sacos, etc.) por materiales sintéticos. Debido a lo anterior, se han buscado nuevas formas de aprovechamiento, a través de alternativas tecnológicamente viables que reditúen beneficios económicos, como es su uso en la obtención de materiales compuestos. Se ha reportado el uso de las fibras en la obtención de materiales compuestos con matrices termoplásticas, termofijas y cementicias. Batista y Valdés [58] obtuvieron perfiles con fibras cortas de henequén con partículas de madera de pino y una matriz de polietileno de alta densidad (PEAD) mediante el método de extrusión.

Se observó que la resistencia a la tensión de los materiales reforzados con la fibra de henequén, oscilan entre 12 y 15 MPa, ligeramente menor que la del material con partículas de madera, pero los valores de resistencia al impacto y módulo de elasticidad duplican los obtenidos con las partículas de madera. Soto y Rivera [59] usaron fibras de henequén como refuerzo en resinas termofijas (matriz de poliuretano), determinando que el aumento del contenido de fibra en el material incrementa las propiedades estudiadas, obteniendo un máximo cuando se tuvo un 20 % de contenido de fibra en el material compuesto. Acevedo y Luna [60] evaluaron el efecto de los tratamientos químicos superficiales de fibras naturales, para modificar sus propiedades y mejorar la adherencia con la matriz, en materiales compuestos de base cementicia (concretos y morteros).

1.4 Procesamiento de materiales compuestos fibro-reforzados con matriz termoplástica

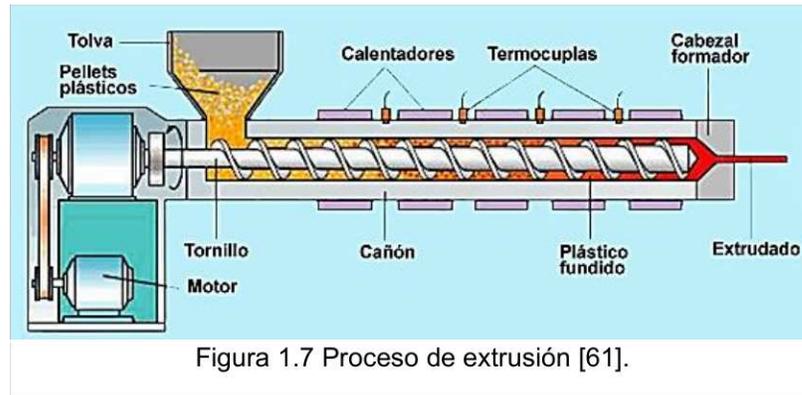
Los métodos más comunes para la obtención de materiales compuestos fibro-reforzados con matriz termoplástica son los procesos de extrusión, de inyección y moldeo por compresión. El primero se utiliza tanto para el mezclado de la matriz y las fibras para obtener el material en forma de pellets que pueden ser usados en los otros procesos, así como en la obtención de los productos finales.

1.4.1 Extrusión.

La palabra extrusión proviene del latín “extrudere” que significa obligar a que un material determinado pase por un orificio. En un proceso de extrusión de termoplásticos, el polímero fundido es forzado a pasar a través de un dado que da forma al material ya formulado (hilos, perfiles, etc.). Para asegurar su estabilidad del producto obtenido, es necesario enfriarlo debajo de su temperatura de transición vítrea (T_g) para polímeros amorfos o de su temperatura de fusión (T_f) para polímeros semicristalinos. Se puede decir que la extrusión es un proceso que, a través de la aplicación de presión mediante la rotación de un tornillo sin fin (o husillo) en el interior de la cavidad conocida como barril (o cañón), el plástico en estado fundido pasa por un orificio para posteriormente ser enfriado (Figura 1.7). En el extrusor se distinguen tres zonas que corresponden a tres diferentes estados físicos del polímero [61].

- ❖ La zona de alimentación donde el material está completamente en estado sólido, granular, polvo, cuentas, hojuelas, más o menos compactado.

- ❖ La zona plastificante, donde ocurre el fundido del polímero, donde ambos estados sólido y líquido están presentes.
- ❖ La zona de dosificación, donde el polímero totalmente fundido es empujado hacia el final del extrusor.



Las variables que se regulan en el proceso de extrusión son el perfil de temperaturas, es decir la temperatura en cada zona del extrusor y la velocidad de giro del husillo. El control de la temperatura del polímero en la última sección del extrusor es importante por muchas razones, tales como evitar la posible degradación térmica. Si la temperatura es muy alta, la baja viscosidad puede hacer que el proceso de post-extrusión sea imposible o difícil de manejar y el calor excesivo es un desperdicio de energía [61, 62].

Durante la obtención por extrusión de materiales compuestos fibro-reforzados se usan fibras cortas, debido a las tensiones de cizalla que se producen en la zona de plastificación de la extrusora. Si la fibra es demasiado larga, provoca fricción interna de las fibras con un incremento de temperatura, que puede provocar degradación de las fibras naturales. Se han obtenido materiales compuestos espumados mediante extrusión de una mezcla de Polietileno de Alta Densidad/Etileno Acetato de Vinilo (HDPE/EVA) con fibra de cabuya y coco, lo que se han aplicado al sector automotriz [63]. También se ha usado la madera y sus residuos como fuentes de fibras naturales en la obtención de materiales compuestos. Pedraza y colaboradores [64] obtuvieron perfiles mediante extrusión a partir de pellets de un material compuesto a base de cedro rojo y polietileno de baja densidad.

1.4.2 Moldeo por compresión.

El proceso de moldeo por compresión de materiales compuestos (Figura 1.8) consiste básicamente de 3 etapas: obtención de láminas o pellets en un proceso anterior (por extrusión) de materiales compuestos, formado mediante compresión y la extracción de

molde. La primera etapa varía en función del producto final, ya que es importante evitar la temperatura de fusión cuando lo único que se requiere es que las fibras del material cedan ante el conformado con la forma de la placa que ejerce presión. La etapa del formado requiere de un molde con la forma del producto, que previo a su calentamiento ejercerá una presión sobre el material para que el proceso sea el adecuado. La última etapa, la de extracción, consiste en sacar cuidadosamente el producto del molde una vez que éste se enfríe [65].

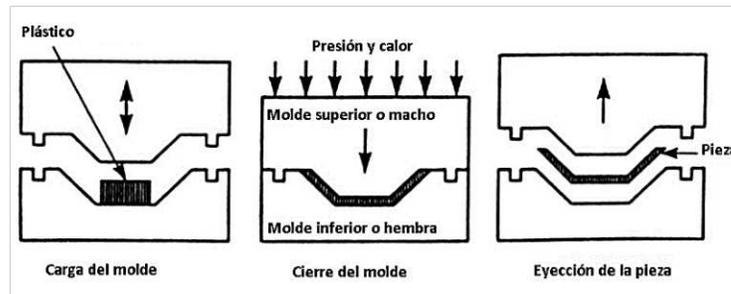


Figura 1. 8 Esquema del moldeo por compresión [65].

Al seleccionar este proceso, se tiene que tener en cuenta que el material que se utilizará para el moldeo por compresión en algunos casos pasa por un primer proceso (extrusión), para obtener los pellets o perfiles a comprimir, por lo que se puede afectar a las propiedades de la fibra natural en esta primera etapa. El proceso de manufactura de un material puede beneficiar o disminuir las propiedades mecánicas o térmicas del material, el moldeo por compresión permite obtener materiales con elevada resistencia a la tracción y al impacto [66].

1.4.3 Moldeo por inyección.

Para materiales termoplásticos, este proceso (Figura 1.9) consiste en obtener una pieza gracias a un molde que alberga la forma de dicha pieza. El material se funde en un extrusor y se inyecta a presión al molde a través de una boquilla hasta su completo llenado, se mantiene la presión constante mientras se enfría la pieza dotándolo de su forma final, se abre el molde y se expulsa la pieza. Elementos fundamentales en la inyección de plástico son los siguientes [67].

- ❖ Control de Temperatura: La temperatura es importante para conseguir que el polímero inyectado se funda completamente y fluya dentro del molde.
- ❖ Presión: La presión que ejerce el proceso también es un elemento clave para que

material fundido mantenga forma a la del molde durante la inyección y en enfriado del molde.

- ❖ Velocidad: El polímero fundido pasa, a través de las cavidades, directamente al molde en cuestión de segundos. Este proceso debe ser rápido, ya que desde el primer momento que la materia entra al molde empieza a enfriarse. Por este motivo, el llenado del molde debe ser muy rápido y controlado.

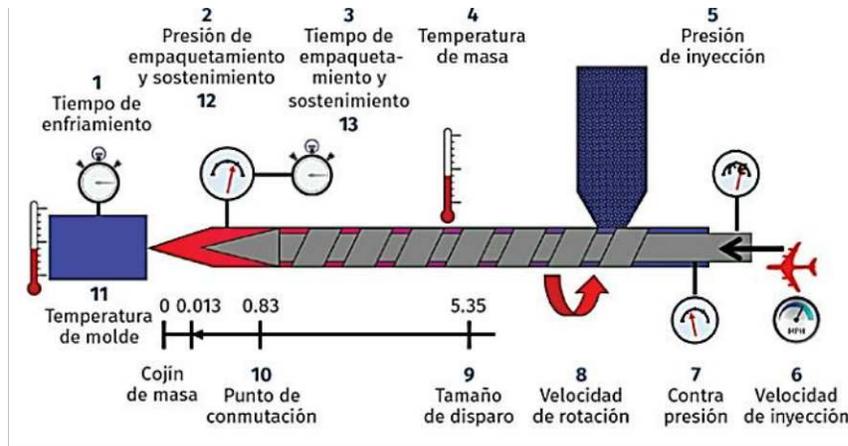


Figura 1. 9 Esquema del proceso de inyección de plásticos [67].

Para la obtención de materiales compuestos fibro-reforzados, se debe tener en cuenta los cambios que ocurren en las propiedades de fundido de las matrices termoplásticas debido al contenido de fibras. Se ha reportado que las fibras tienden a orientarse en dirección paralela al flujo dada la alta velocidad de corte, mientras que siguen una distribución más aleatoria conforme se acerca al centro de la pieza debido al flujo divergente del polímero [68].

Justificación

Hoy en día las fibras naturales han vuelto a llamar la atención para su aplicación en la obtención de productos de interés comercial, debido a las ventajas que presentan: son amigables con el medio ambiente ya que son biodegradables, se pueden obtener de residuos agroindustriales y pueden reducir la contaminación generada por la acumulación de estos residuos en tiraderos a cielo abierto [56-58]. En México, los agaves usados en la producción de fibras como el henequén generan una gran cantidad de residuos sólidos conocido como bagazo de henequén y que está constituido por un componente fibroso y otro no fibroso; aunque las fibras obtenidas del henequén se han evaluado en la obtención de materiales compuestos, no se han realizado estudios de caracterización de las fibras del bagazo del henequén, para poder proponer posibles aplicaciones en la obtención de materiales compuestos y de igual forma disminuir la cantidad que se desperdicia y es fuente de contaminación del suelo y del manto freático debido a su degradación en las bagaceras.

En este proyecto, se pretende aprovechar los residuos fibrosos que se generan en la industria henequenera y ayudar al medio ambiente, de tal forma que se pueda contribuir a rescatar esta agroindustria, cuya producción ha disminuido con el paso de los años.

Hipótesis

El contenido y tamaño de las fibras del bagazo de henequén pueden ser utilizadas como reforzante de un material compuesto termoplástico de polipropileno, lo cual pudieran mejorar sus propiedades mecánicas así, como su procesamiento en la obtención de perfiles.

Objetivos

Objetivo general

Obtener un perfil rectangular de material compuestos con las fibras obtenidas del bagazo de henequén y una matriz de polipropileno.

Objetivos específicos

1. Caracterizar las fibras del bagazo mediante la determinación de sus propiedades mecánicas y térmicas y su composición química.
2. Determinar el efecto del tamaño y contenido de fibra sobre la procesabilidad y las propiedades mecánicas a tensión y flexión de materiales compuestos con matriz de polipropileno.
3. Obtener un perfil rectangular de materiales compuestos fibra/polipropileno

Capítulo 2. Parte experimental.

En la Figura 2.1 se muestra de manera general el proceso seguido para el desarrollo de este proyecto. Se obtuvieron las fibras mediante la separación de la parte fibrosa y no fibrosa del bagazo de henequén; ambas fracciones se caracterizaron mediante la determinación de su composición química y su descomposición térmica. Adicionalmente a las fibras se les determinó sus propiedades mecánicas. Se obtuvieron los materiales compuestos con matriz de PP en forma de láminas para determinar el efecto del contenido y de la longitud fibra sobre las propiedades mecánicas, térmicas y reológicas. Por último, se extruyeron dos formulaciones para la obtención de un perfil rectangular sólido de 5 cm x 2.54 cm y 40 cm, y se determinaron sus propiedades mecánicas a flexión.



Figura 2. 1 Proceso seguido para el desarrollo de este proyecto

2.1 Materiales y métodos

2.1.1 Fibras del bagazo del henequén

En esta sección se presentará la manera en que se obtuvieron las fibras del bagazo de

henequén, así como los métodos para su caracterización mecánica y térmica.

2.1.1.1 Obtención de las fibras del bagazo de henequén.

El bagazo de henequén se colectó en la Desfibradora San Carlos del Municipio de Baca, Yucatán. Se colectó bagazo fresco, esto es, recién obtenido durante el desfibrado de la hoja de henequén y vertido en la bagacera (Figura 2.2).



Figura 2. 2 Colecta de bagazo de henequén. A) sitio de disposición o bagacera y B) bagazo fresco

La separación de la parte fibrosa y no fibrosa que componen el bagazo se llevó a cabo de forma manual, la fibra obtenida se lavó para quitar el exceso de la pulpa que está adherida a la misma. Ambas fracciones se secaron al sol durante tres días. En la Figura 2.3A se aprecian las fibras obtenidas del bagazo, las cuales se midieron con una regla obteniendo una longitud promedio de 45 cm. La fracción no fibrosa está compuesta mayormente por la cutícula, parénquima y fibras delgadas que son muy difíciles de separar de los otros componentes (Figura 2.3B).



Figura 2. 3 Componentes del bagazo de henequén. A) Fracción fibrosa, B) Fracción no fibrosa

2.1.1.2 Obtención de diferentes longitudes de fibra

Las fibras se molieron en un molino de cuchillas para obtener diferentes longitudes y poder evaluar su efecto en la obtención de los materiales compuestos mediante extrusión. Para obtener las diferentes longitudes de fibras y en cantidad suficiente, se usaron molinos de cuchillas y cribas con diferente apertura de malla (Figura 2.4). Se usó un molino de cuchillas marca Pagani con tamices de 4 y 2 mm de diámetro para moler las fibras de bagazo de henequén que tiene una longitud promedio de 45 cm. El material molido se tamizó en un equipo Ro Tap modelo RX-29 utilizando tamices de la marca M.S. Tyler con mallas de 20, 40, 60, 80, 100, 120 y fondo. Se pesó y midieron las fibras retenidas en cada tamiz. Para medir las dimensiones (longitud y diámetro) de las fibras se utilizó un microscopio Leica DMLM, de las imágenes se obtuvieron las longitudes usando el software Image Pro Plus. Se observa que cambiando el tamaño de apertura de la criba se modifica la fracción en peso retenida en cada malla y la longitud promedio (Tabla 2.1). Debido a que no se obtuvo cantidad suficiente para las fibras más pequeñas de 2 mm, se usó un molino de la marca Brabender con una criba de 1 mm. Para este trabajo, se seleccionaron las fibras con longitudes promedio de 2, 4, 6 y 8 mm.



Figura 2. 4 Molino Pagani 1520 con cribas de 4 y 2 mm (A) y molino Brabender con criba de 1 mm (B)

Tabla 2. 1 Distribución de longitud de la fibra del bagazo de Henequén retenida en los tamices

Malla	Molino pagani Criba de 4 mm		Molino pagani Criba de 2 mm		Molino Brabender Criba de 1 mm	
	Fracción retenida (%)	Longitud promedio (mm)	Fracción retenida (%)	Longitud promedio (mm)	Fracción retenida (%)	Longitud promedio (mm)
Tapa-20	44.40	10.79	27.36	7.86	3.52	6.0
20-40	28.83	8.14	36.91	5.99	48.79	3.23
40-60	18.87	7.51	22.31	4.63	28.17	2.22
60-80	4.25	5.69	5.77	4.12	6.59	1.36
80-100	1.04	2.29	1.04	2.86	2.26	2.27
100-120	0.46	2.19	1.6	2.30	2.64	1.87
120-Fondo	2.11	0.79	4.97	1.00	8.01	0.56

2.1.1.3 Determinación de Composición química

Se determinó la composición química de la fracción fibrosa y no fibrosa del bagazo de henequén mediante la determinación de extraíbles, lignina y holocelulosa.

El contenido de extraíbles se determinó mediante el método T-204 cm-97 de TAPPI. El material tamizado y retenido en la malla 40-60 se colocó en cartuchos de papel filtro, los que se pusieron a peso constante usando una estufa de convección marca Yamato modelo DVS402C a 105 °C durante 3 ciclos de 2 horas. Se pesaron 2 gramos de la fibra o de la pulpa en sus correspondientes cartuchos y se secaron en la estufa de convección por 2 horas hasta obtener peso constante. Los cartuchos se colocaron en el extractor Soxhlet (Figura 2.5A) y se extrajeron los compuestos de baja polaridad con una mezcla benceno/etanol 2/1, por un mínimo de 16 ciclos. Los cartuchos se drenaron, se secaron primero a temperatura ambiente en una campana de extracción y posteriormente en estufa de convección a 100 °C hasta peso constante. El procedimiento se repitió usando etanol como disolvente para extraer los compuestos de mediana polaridad. Se concentraron las soluciones utilizando un evaporador rotatorio IKA RV 10 (Figura 2.5B) hasta la remoción del disolvente para su posterior caracterización de los extraíbles obtenidos en cada etapa.

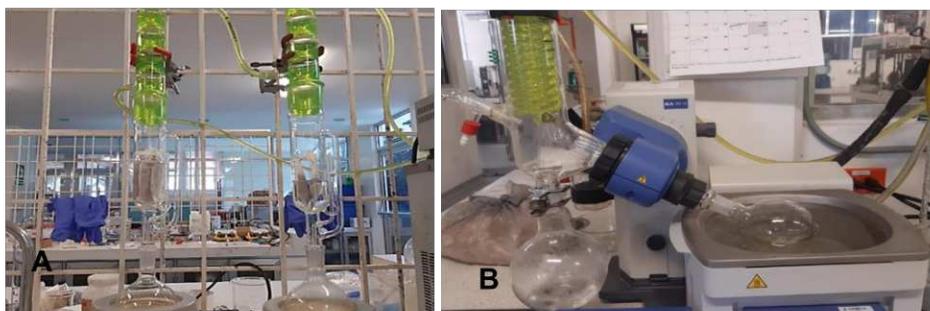


Figura 2. 5 Obtención de extraíbles con solventes orgánicos. A) Extractor Soxhlet y B) evaporador rotatorio IKA RV 10

La extracción con agua (Figura 2.6), para la remoción de compuestos polares, se llevó a cabo usando el método T-207 cm-99 de la TAPPI. Se pesó el material resultante de la extracción de los solventes orgánicos, se colocó en matraces con 500 mL de agua destilada, y se calentó a ebullición durante una hora. La suspensión resultante se filtró usando embudos de vidrio poroso, puestos previamente a peso constante, con una bomba de vacío marca millipore. El proceso de ebullición se repitió en dos ocasiones y el sólido resultante se secó en una estufa de convección hasta peso constante.



Figura 2. 6 Sistema para la extracción con agua

Para el cálculo de los extraíbles, en cada etapa, se utilizó la siguiente ecuación.

$$\% \text{ Extraíbles} = \left(\frac{D - E}{D} \right) * 100 \quad (1)$$

Donde:

D = Peso de la muestra sin extraer en gramos

E = Peso de la muestra libre del extraíble en gramos

Se determinó el contenido de lignina utilizando el método Klason, según la técnica TAPPI 222 modificada, usando la muestra libre de extraíbles. Se pesó aproximadamente 1 g de material libre de extraíbles, se sometió a una hidrólisis ácida con 15 ml de ácido sulfúrico al 72% a temperatura constante de 15 °C y con agitación por una hora. A la suspensión se le agregó 560 ml de agua destilada y se mantuvo en ebullición durante 4 horas. La solución se filtró en un filtro de vidrio poroso tipo "F", puestos a peso constante, y el filtro con el sólido recuperado se secaron a 100°C en una estufa de convección hasta peso constante. El contenido de lignina se obtuvo de la siguiente ecuación:

$$\%Lignina = \left[\left(\frac{E}{F} \right) * \left(1 - \frac{G + H}{100} \right) \right] * 100 \quad (2)$$

Donde:

E= peso de sólido recuperado en gramos

F= peso de la muestra libre del extraíble en gramos

G= extraíbles con solventes orgánicos en % peso

H= extraíbles con agua en % peso

El contenido de holocelulosa (celulosa + hemicelulosa) se determinó restando el contenido de lignina y de extraíbles totales del total expresado en porcentaje como se indica a continuación:

$$\%Holocelulosa = 100 - \%lignina\ Klason - \% Extraibles\ Totales \quad (3)$$

2.1.1.4 Determinación de propiedades térmicas

Se determinó el perfil de degradación térmica de los materiales, para verificar el rango de temperatura en el que el material es estable térmicamente. Se usó una balanza termogravimétrica TGA de Perkin Elmer TGS-7 mediante el siguiente procedimiento: En un crisol de platino se colocaron 20 mg de muestra, se colocó en la termobalanza y se registraron los cambios de masa debido a los procesos de degradación térmicos, de la muestra, ocurridos durante la prueba. El análisis se realizó de 50 a 700 °C, con una rampa de calentamiento de 10 °C/min y un flujo de nitrógeno de 20 ml/min.

2.1.1.5 Determinación de propiedades mecánicas

Se determinaron las propiedades mecánicas de las fibras, partir de las curvas carga-elongación obtenidas usando una máquina de pruebas universales Instron modelo 1125 (Figura 2.7), usando la norma ASTM D3822-07. Se seleccionaron 40 muestras de fibras al azar y se midieron segmentos de 40 cm de longitud de la fibra. La fibra se colocó en las mordazas neumáticas especiales para ensayos en fibras y se ensayaron usando 50 mm de longitud entre las mordazas, una velocidad de desplazamiento de 5 mm/min, de acuerdo a la norma antes mencionada, y una celda de carga de 100 N. Se determinó la densidad lineal dividiendo el peso total de las fibras entre la longitud de la fibra y con este dato se calculó el valor de denier de las mismas.



Figura 2. 7 Máquina de pruebas universales marca Instron modelo 1125 con mordazas para fibras

2.1.2 Matriz Polimérica y Aditivos

Como matriz para la obtención de los materiales compuestos se usó polipropileno de la marca Valtec HP423M grado extrusión de Indelpro proveniente de la empresa Termoplásticos del Caribe S.A. de C.V. En la tabla 2.2 se muestran las propiedades del polipropileno.

Tabla 2. 2 Propiedades del polipropileno Valtec HP423M

Propiedad	Valor típico	Método ASTM
Índice de fluidez (g/ 10 min)	3.8	D1238
Densidad, (g/cm³)	0.9	D792A
Resistencia a la tensión, MPa	34.9	D638
Resistencia a la flexión, MPa	58.2	D790
Resistencia al impacto izod con muesca a 23°C, J/m	25.0	D256

Se usó un copolímero de polipropileno-anhídrido maleico como agente acoplante conocido comercialmente como Polybond 3200, con un índice de fluidez de 400 g/10 min y un peso molecular 9,100 daltons. Los polímeros (Polipropileno y el Copolimero) se molieron en un molino de la marca Brabender con una criba de 1 mm.

Como ayuda de proceso (AP) se usaron esteres de ácidos grasos (Struktol TPW113) proveniente de Struktol Company of America, con punto de inflamación de 67-77 °C. En la Tabla 2.3 se muestran sus propiedades.

Tabla 2. 3 Propiedades del Struktol TPW113

Propiedades

Apariencia	Pastilla o polvo
Punto de inflamación, COC (°C)	70-80
Gravedad específica	1.005
Estabilidad de almacenamiento	Al menos 2 años bajo condiciones normales de almacenamiento
Presentación	Bolsa de 25 (kg)

Como estabilizador UV se usó el Bis (2, 2, 6,6-tetramethyl-4-piperidyl) sebacate (S-UV), suministrado por SIGMAALDRICH, con un peso molecular de 481 daltons y una temperatura de fusión de 86°C.

2.2 Obtención del material compuesto

Se utilizó fibra del bagazo de henequén en forma de fibras cortas con diferentes longitudes promedio (de 2, 4, 6 y 8 mm) y diferente contenido (10, 20, 30 y 40 %), adicionando el polipropileno, el copolimero, la ayuda del proceso y el estanzador UV para obtener el material compuesto.

2.2.1 Obtención de laminado del material compuesto

Para determinar el efecto del tamaño y contenido de la fibra en las propiedades de los materiales compuestos, se extruyeron laminados (Figura 2.8), usando un extrusor doble-husillo cónico marca Brabender modelo CTSE-V/MARK 11 y un dado de rendija con una abertura máxima de 2 mm y un ancho de 10 cm. Se utilizaron dosificadores marca Brabender para la alimentación de los materiales, uno para los polímeros y aditivos (polipropileno, agente acoplante, ayuda del proceso y el estabilizador UV) y otro para las fibras, la composición de alimentación se controló modificando la velocidad de los dosificadores. Las fibras se secaron en una estufa marca Felisa modelo FE-291AD a 100 °C para eliminar el exceso de humedad. Se prepararon 16 mezclas de 300 g cada una, ya que para cada longitud de fibra (2, 4, 6 y 8 mm) se obtuvieron laminados con diferentes contenidos de fibras (10%, 20%, 30% y 40% porcentaje en peso de la fibra). El contenido (con base al peso de fibra) de agente acoplante, ayuda de proceso y agente de protección UV se mantuvieron constantes y fueron de 5%, 2% y de 0.5%, respectivamente con respecto al peso de la matriz. Se usó una temperatura de 180 °C en la zona de alimentación, venteo y mezclado del extrusor, y de 180 °C en el dado de extrusión. La velocidad de rotación de los husillos durante el procesamiento fue de 22 rpm, se usó una banda transportadora para coleccionar el material extrudido a la salida del dado que proporcionó una velocidad de jalado del material de 0.78 rpm.



Figura 2. 8 Obtención de las láminas de material compuesto en el extrusor doble husillo

2.2.2 Caracterización del material compuesto

Para la determinación de las propiedades mecánicas de los materiales compuestos, se usaron probetas obtenidas de las láminas planas usando un cortador neumático Ceast modelo 6876. Los cortes se hicieron en la dirección de flujo (longitudinal) y transversal a la dirección de extrusión. El ensayo a tensión se llevó a cabo de acuerdo con el procedimiento descrito en la norma ASTM D638, utilizando las probetas tipo IV (Figura 2.9), usando una máquina de pruebas universales marca Instron 5500R modelo 1125a una velocidad de cabezal de 5 mm/min.



Figura 2. 9 Probetas tipo IV de materiales compuestos fibra-PP

Se determinó la degradación térmica de los materiales compuestos empleando un analizador termogravimétrico TGA-7 de Perkin Elmer usando el siguiente procedimiento: En un crisol de platino se colocaron 20 mg de muestra, se colocó en la termobalanza y se registraron los cambios de masa debido a los procesos térmicos ocurridos durante la prueba. El barrido de temperatura fue de 50-700 °C con una rampa de calentamiento de 10 °C/min y un flujo de 20 ml/min de nitrógeno.

La morfología, de la zona de fractura criogénica, de las probetas se obtuvo usando un Microscopio Electrónico de Barrido JEOL modelo JSM-6360LV a una distancia de trabajo de aproximadamente de 10mm, con un voltaje de 10kV. La probeta se sumergió en nitrógeno por 5 minutos y se fracturó. La sección fracturada se recubrió con una película de oro para mejorar el contraste.

Para evaluar el efecto de la longitud y contenido de fibra sobre la procesabilidad de los materiales compuestos, se llevaron a cabo pruebas reológicas a cortante para evaluar la viscosidad compleja, el módulo de almacenamiento y pérdida. Se usó un reómetro rotacional AR-2000 (TA Instruments, New Castle, DE, USA) equipado con una geometría de platos paralelos, la temperatura empleada fue de 180 °C. La región viscoelástica se confirmó inicialmente por un barrido de deformación (0 a 100%) y los barridos de frecuencia se llevaron a cabo en una frecuencia angular de 0.1 a 100 rad/s.

2.3 Obtención del perfil rectangular.

Para la obtención del perfil rectangular sólido de 40 cm de largo, 5 cm de ancho y 2.5 cm de espesor, se diseñó un sistema de inyección modificado que consta de las siguientes partes: un molde, hecho de un perfil de PTR de 5.08 cm x 2.54 cm, que se acopla a la salida del extrusor que permite la obtención del material compuesto en estado fundido. El molde se acopla a la salida del extrusor por un extremo y el otro extremo tiene un orificio de salida con diámetro 3.17 mm (Figura 2.10). Se utilizó un extrusor doble-husillo cónico corrotatorio entrelazado tipo Mark II, marca Brabender CTSE-V/MARK. La temperatura fue de 180 °C en las 4 secciones del extrusor y se usó una velocidad de rotación de los husillos de 40 rpm para que el molde se llenará sin que el material en estado semifundido (blando) se solidifique. Se utilizó la misma metodología para hacer los materiales compuestos para la alimentación de la fibra y del polímero al extrusor. Una vez que el molde se llena completamente y cinco minutos después de que el material empieza a salir por el orificio, se retira el molde del extrusor y enfría con agua destilada. Una vez frío el molde, la pieza se retira del mismo.



Figura 2. 10 Dado formador del perfil (sistema de inyección modificado)

2.3.1 Caracterización del perfil rectangular

Se determinó la microestructura de la sección transversal y longitudinal del perfil mediante un Microscopio Electrónico de Barrido JEOL modelo JSM-6360LV. Se tomaron pequeñas muestras en dirección al flujo de extrusión (Figura 2.11) y se sumergieron en nitrógeno por 5 minutos para poder fracturarlo de nuevo. Todas las muestras fueron recubiertas con una película de oro para mejorar el contraste.



Figura 2. 11 La flecha indica la dirección de flujo de extrusión donde se tomaron las muestras para la caracterización morfológica.

Se determinaron las propiedades mecánicas a flexión de los perfiles usando el método de flexión a tres puntos (Figura 2.12), de acuerdo a la norma ASTM D790. Se obtuvieron probetas de 8.5 mm de espesor, 23 mm de ancho y 17 cm largo. Para realizar esta prueba se elaboraron 6 probetas. Las pruebas se realizaron en una máquina universal de pruebas mecánicas Instron 5500R modelo 1125 a una velocidad de cabezal constante de 3.62 mm/min. La norma menciona que, si la muestra no se fractura durante la prueba, se puede detener cuando la probeta alcance un 5 % de deformación equivalente a 18.13 mm de desplazamiento.

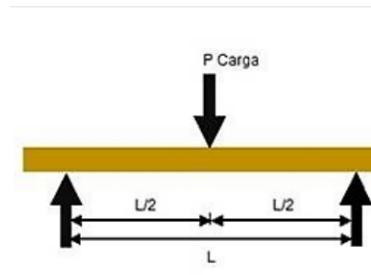


Figura 2.12 Representación esquemática del método de flexión a tres puntos.

A partir de las curvas esfuerzo-deformación generadas en este ensayo, se calcularon los parámetros mecánicos (resistencia a la flexión, deformación y el módulo de elasticidad) mediante las siguientes ecuaciones.

$$\sigma = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (4)$$

Donde:

σ = Resistencia a flexión de la fibra (MPa)

P = Carga en un punto de la curva carga-deflexión (N)

L = Longitud entre soportes (mm)

b = Ancho de viga (mm)

d = Profundidad de la viga (mm)

$$\epsilon = \frac{6Dd}{L^2} \quad (5)$$

Donde:

ϵ = Deformación en la superficie (mm/mm)

D = Deflexión máxima (mm)

L = Longitud entre soportes (mm)

$$E = \frac{L^3 m}{4bd^3} \quad (6)$$

Donde:

E = Módulo de elasticidad (MPa)

m = Pendiente en la zona lineal de la curva fuerza-deformación (N/mm)

2.3.2 Caracterización térmica por calorimetría diferencial de barrido del perfil rectangular.

El material compuesto se caracterizó térmicamente por calorimetría diferencial de barrido (DSC por sus siglas en inglés). Se cortó una sección delgada del perfil, se colocaron 5 mg en una charola de aluminio y se selló. Se usó un calorímetro PERKIN-ELMER modelo Diamond, las pruebas se realizaron bajo atmósfera de nitrógeno en el rango de temperatura de 55 a 200°C. Se realizó una primera corrida a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min para después enfriar a 40 °C/min. Posteriormente, se realizó una segunda corrida con una velocidad de calentamiento y de enfriamiento de 10 °C/min. El primer barrido de temperatura se efectuó debido a que se requiere borrar el historial térmico de la muestra. Las curvas obtenidas en la segunda corrida se usaron para determinar la temperatura de fusión y cristalización, así como el grado de cristalinidad.

Para el cálculo del grado de cristalinidad se usó la siguiente ecuación [69]:

$$X_c = (\Delta H_m) / (w * \Delta H_{mc}) \quad (7)$$

Donde:

X_c = Es el grado de cristalinidad

ΔH_m = Entalpia de fusión del compuesto

ΔH_{mc} = Entalpia del polímero 100% cristalino

w = Fracción de la masa del polímero en el material compuesto

Capítulo 3: Resultados y discusión

3.1 Caracterización del bagazo de henequén

3.1.1 Morfología del bagazo de henequén

Como se puede observar en la Figura 3.1, el bagazo está constituido de fibras y de otros componentes de las hojas como el parénquima, cutícula, etc. El bagazo se separó fácilmente, una vez seco, en una fracción fibrosa y una fracción no fibrosa, que representan el 15 y 75% en peso seco del bagazo, respectivamente.



Figura 3. 1 Fotografías del bagazo de henequén (a) y de las fracciones fibrosas (b)

Durante el análisis morfológico se observó que las fibras tuvieron una longitud y un diámetro promedio de 40 cm y 0.125 mm, respectivamente; están constituidas por cilindros vasculares o traqueidas (Figura 3.2A y B), en donde las fibras de celulosa, del orden de 20 micras de diámetro, están alineadas en forma helicoidal formando los cilindros mientras que la lignina y la hemicelulosa recubren las fibras de celulosa para formar la pared de los cilindros y mantenerlos unidos en la fibra entera (indicada por la flecha en la figura). La superficie de las fibras es rugosa, observando zonas con desprendimiento del recubrimiento de lignina y hemicelulosa (indicada por la flecha en la figura) e incluso el desprendimiento de fibras de celulosa (Figuras 3.2C-D), lo que se podría deber al daño mecánico que sufren durante el proceso de desfibrado.

La fracción no fibrosa también conocida como pulpa, consiste de partículas con diferentes formas y tamaños como se aprecia en las micrografías SEM (Figura 3.3). Se observa la cutícula en forma de películas enrolladas (Figura 3.3 A y B); la cutícula es la capa protectora que se encuentra en la superficie más externa de la hoja y es la que interacciona con el medio ambiente. Está constituida principalmente por compuestos lipofílicos como la cutina y ceras cuticulares [70] y desempeña un papel importante al actuar como una barrera que

reduce la pérdida de agua.

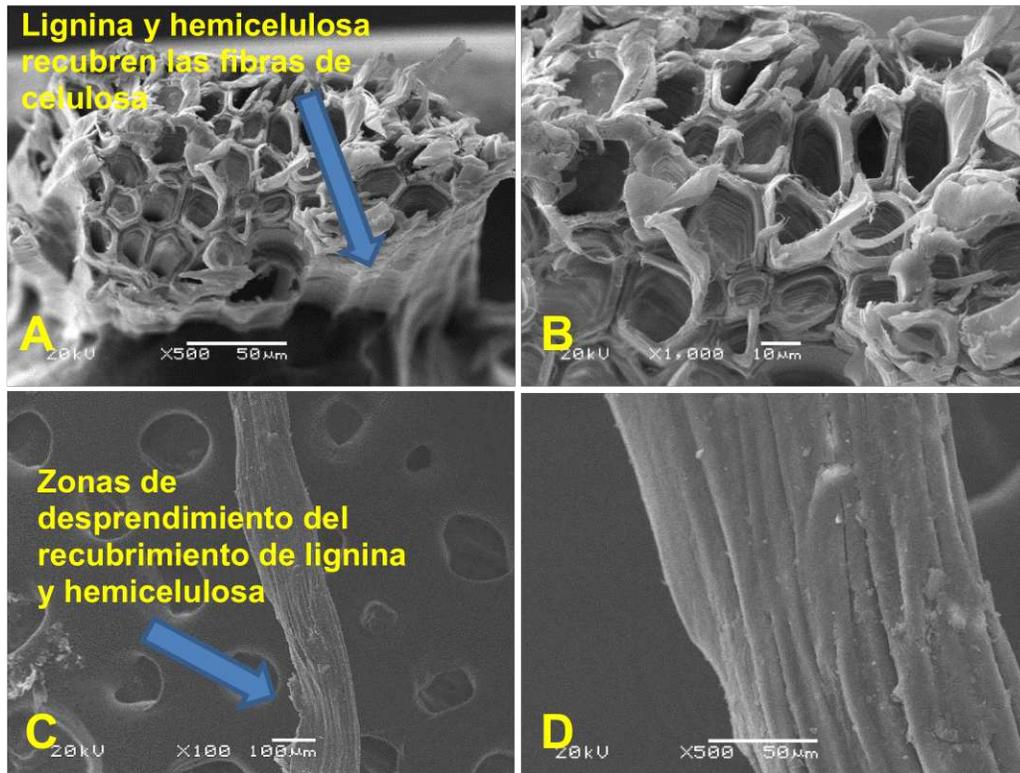


Figura 3. 2 Micrografías SEM de fibras del bagazo de henequén. A) Y B) vista de sección transversal, C) y D) vista de superficie longitudinal

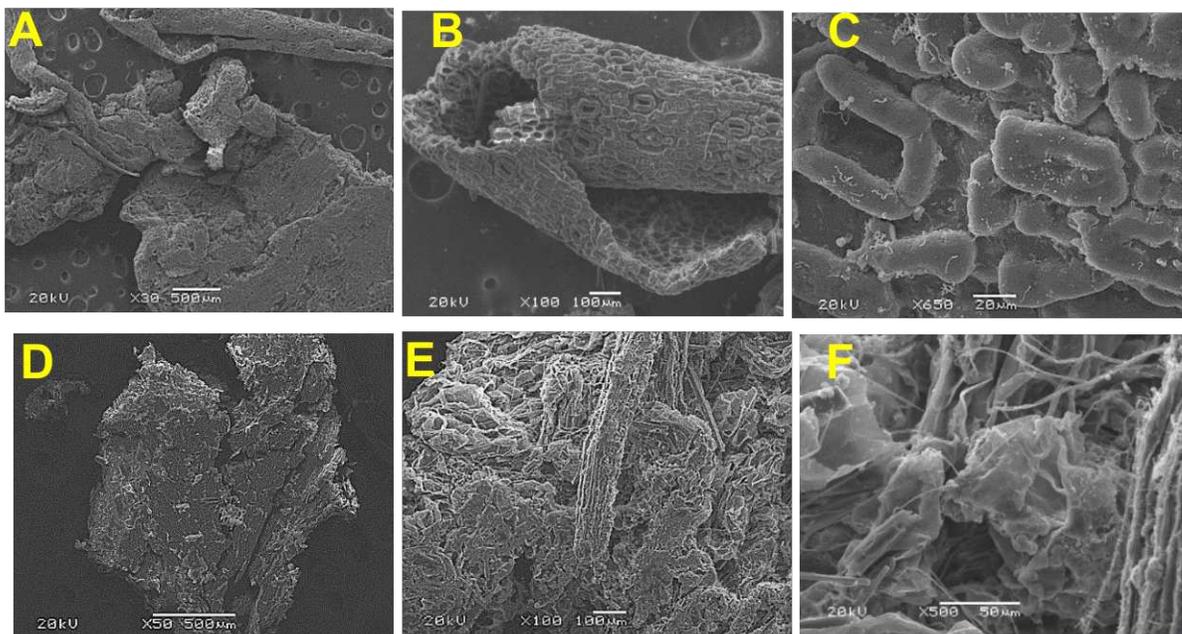


Figura 3. 3 Micrografías SEM de las partes no fibrosas del bagazo de henequén. Cutícula (A, B, C); parénquima (D, E, F)

3.1.2 Composición química

En la Tabla 3.1 se muestran los contenidos de extraíbles, lignina y holocelulosa de las fracciones del bagazo y que son los componentes principales de las fibras vegetales. Se puede observar que la fracción fibrosa (ver Figura 3.2) presentan un porcentaje mayor de holocelulosa (celulosa + hemicelulosa) y de lignina con respecto a la fracción no fibrosa. Esto se puede deber a su función en la hoja, ya que las fibras de celulosa proporcionan la resistencia mecánica de las fibras naturales, mientras que la lignina junto con la hemicelulosa actúa como matriz aglomerante de las microfibrillas de celulosa. Las fibras permiten a las hojas soportar la acción mecánica a las que se someten durante los procesos de tensión que cotidianamente soportan. Los contenidos de holocelulosa de las fibras de bagazo fueron menores que los reportados en la literatura para las fibras del henequén [71] mientras que se obtuvieron valores más altos de lignina. Esto se podría deber a que las fibras de henequén comerciales se han sometido a procesos de peinado que remueven impurezas. Se obtuvieron valores de extraíbles totales mayores para la parte no fibrosa (12.8%) en comparación con los obtenidos de la parte fibrosa (8.27%), siendo los extraíbles con benceno-etanol los que presentaron los valores más altos. Debido a que los extraíbles son compuestos de bajo peso molecular, su degradación térmica durante la obtención de los materiales compuestos, puede afectar la coloración final del producto cuando se tiene un alto contenido de extraíbles.

Tabla 3. 1 Composición química de la parte fibrosa y no fibrosa del bagazo de henequén

		Fracción fibrosa (%)	Fracción no fibrosa (%)
Extraíbles	Benceno-Etanol	5.35	9.94
	Etanol	1.68	1.27
	Agua	1.24	1.62
Total de extraíbles		8.27	12.83
Lignina		11.08	9.79
Holocelulosa		80.65	77.38

3.1.3 Caracterización térmica

En la Figura 3.4 se muestran los termogramas TGA y DTGA de la fracción fibrosa y no fibrosa del bagazo de henequén. Se puede observar que los termogramas TGA (Figura 3.4 A) presentan 3 etapas de pérdida de masa, la primera se debe a la pérdida de humedad (10%) en el rango de 50-90 °C (Tabla 3.2); ambas fracciones muestran una descomposición principal en el rango de 200-350 °C, con una pérdida de masa del 65 % en la fracción fibrosa y de 50% de la fracción no fibrosa, debido a la degradación térmica de la celulosa y hemicelulosa que son los principales componentes de las fibras lignocelulósicas. La degradación térmica de la celulosa ocurre en dos etapas: en la primera se observa una reducción del tamaño de cadena debido a ruptura de enlaces con la generación de radicales libres, grupos carboxilos y carbonilos, así como la formación de carbón; mientras que en la segunda incluye la depolimerización de la celulosa por ruptura de las unidades glucosídicas y la formación de levoglucosano [72]. La degradación de la hemicelulosa se aprecia como un hombro en las curvas DTGA (Figura 3.4B) aproximadamente a 315 y 330°C para la fracción fibrosa y no fibrosa, respectivamente. Se observa que la descomposición máxima ocurre aproximadamente a 340 °C. La pérdida de peso a temperaturas mayores de 400 °C, se atribuye a la segunda etapa de degradación de la celulosa y a la degradación de la lignina.

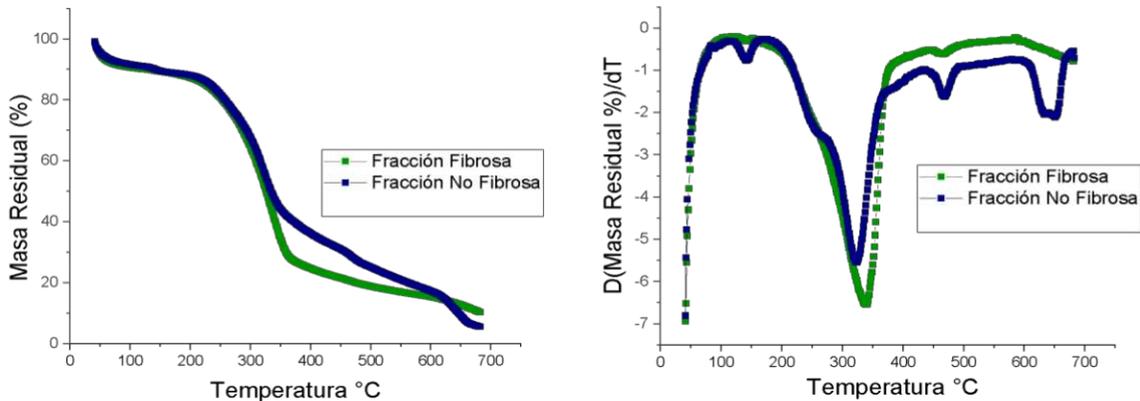


Figura 3. 4 Termogramas de TGA (A) y DTGA (B) de las fracciones obtenidas del bagazo

Tabla 3. 2 Rangos de temperatura y porcentaje de pérdida de masa

PÉRDIDA DE MASA DEBIDO A:	FRACCIÓN FIBROSA		FRACCIÓN NO FIBROSA	
	RANGO DE TEMPERATURA (°C)	MASA PERDIDA (%)	RANGO DE TEMPERATURA (°C)	MASA PERDIDA (%)
Agua	50-90	10	50-90	10
Hemicelulosa-celulosa	250-350	65	250-350	50
Celulosa-Lignina	400-600	25	400-650	40

3.1.4 Propiedades mecánicas de las fibras

En la Figura 3.5 se muestra la curva esfuerzo-deformación de las fibras del bagazo de henequén. Se observa que se presentan dos zonas de deformación, en la primera (a valores de deformación menores del 5%) la pendiente de la curva es mayor que la segunda (a deformaciones mayores del 5%). Este comportamiento se puede atribuir a la morfología de las fibras (ver Figura 3.2). Como se ha señalado antes, la fibra es un grupo de tubos huecos que se mantienen unidos por hemicelulosa y lignina. A su vez, los tubos no presentan un diámetro homogéneo, lo que podría provocar que los tubos de diámetro menor fallen primero, a lo largo de las fibras, que los tubos de mayor diámetro. Con respecto a las propiedades mecánicas de las fibras, se obtuvieron valores de resistencia a la tensión y del módulo de 2.78 gf/den y 98 gf/den, respectivamente. Estas propiedades son más bajas que las reportadas en la literatura para las fibras de henequén que son de 4.7 gf/den para la resistencia a la tensión y 103 gf/den para el módulo [73]. Este comportamiento se podría deber al daño mecánico que sufren las fibras durante el desfibrado mecánico de las hojas, ya que las fibras son sometidas a esfuerzos de compresión y de tensión durante dicho proceso.

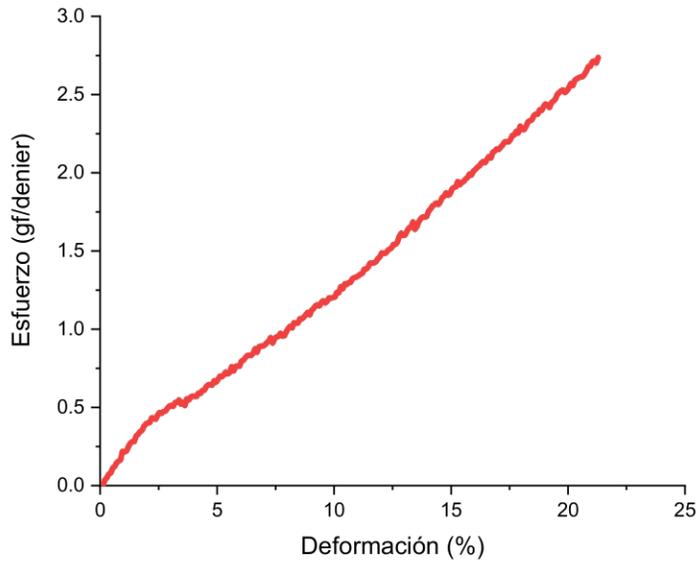


Figura 3.5 Curva Esfuerzo-Deformación de las fibras obtenidas del bagazo de henequén.

3.2 Caracterización de los materiales compuestos

3.2.1 Propiedades térmicas de los materiales compuestos

En la Figura 3.6 se muestra los termogramas de TGA y DTGA del PP usado como matriz y de los materiales compuestos con fibras de 8 mm de longitud promedio de y diferentes contenidos de fibra. Se observa que el PP se mantiene estable hasta temperaturas de 400 °C y posteriormente su masa decae bruscamente debido a la generación de compuestos volátiles durante su descomposición térmica, observándose en las curvas de DTGA un pico a 460 °C.

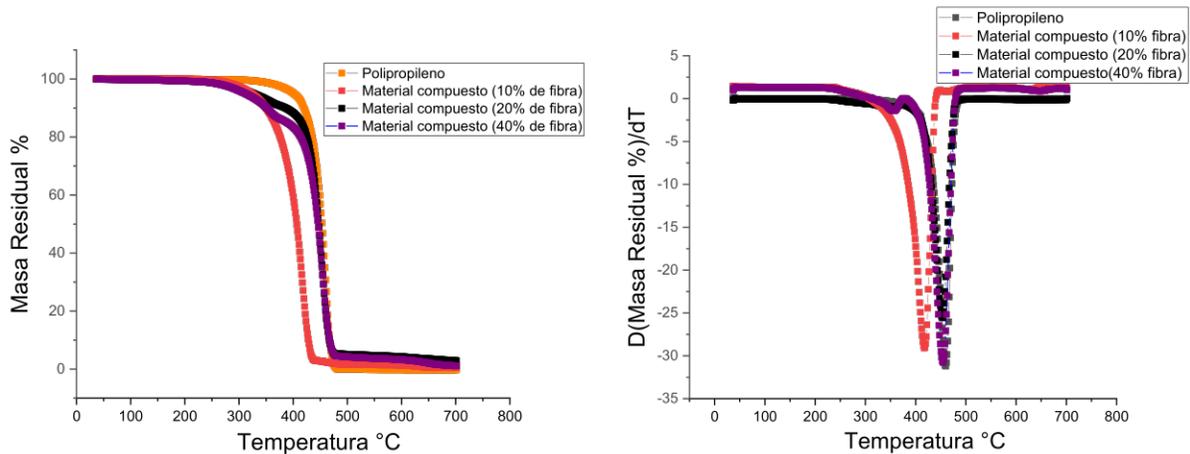


Figura 3. 6 Termograma de TGA y DTGA del PP y de los materiales compuestos con fibras de 8 mm de longitud promedio y diferentes contenidos de fibra

En los materiales compuestos con 20 y 40 % se puede observar dos zonas de pérdida de masa. La primera pérdida de masa corresponde a la descomposición térmica de la fibra y la segunda a la descomposición térmica de la matriz de polipropileno. La primera degradación térmica ocurre en el rango de 300-410 °C con un pico máximo de descomposición a 360°C (curva de DTGA) y que corresponde a la degradación de la hemicelulosa y celulosa contenidas en la fibra. La segunda etapa correspondiente al pico en la curva de DTGA a una temperatura de 450°C puede ser atribuido a la degradación de la lignina y de la matriz de polipropileno. Con respecto a los materiales compuestos con 10% de fibra, solamente observa una caída de masa en el rango de 300-410 °C y un pico máximo a 410 °C. El corrimiento de la descomposición térmica del material compuesto con 10 % de fibra, hacia temperaturas más bajas, con respecto a los materiales con contenidos del 20 y 40%, se podría deber a la presencia de aire en el equipo, los que resulta en una combustión parcial de la muestra, así como una mayor velocidad de degradación de la fibra y del PP.

3.2.2 Propiedades mecánicas.

En la Figura 3.7 se muestra las curvas típicas de esfuerzo-deformación para los materiales compuestos obtenidos usando fibras del bagazo de henequén con diferente longitud promedio (2, 4, 6 y 8 mm). Se puede observar que los valores de esfuerzo aumentan al incrementar la longitud de fibras; siendo muy pequeño el efecto a deformaciones menores del 2% y más notorio a deformaciones mayores.

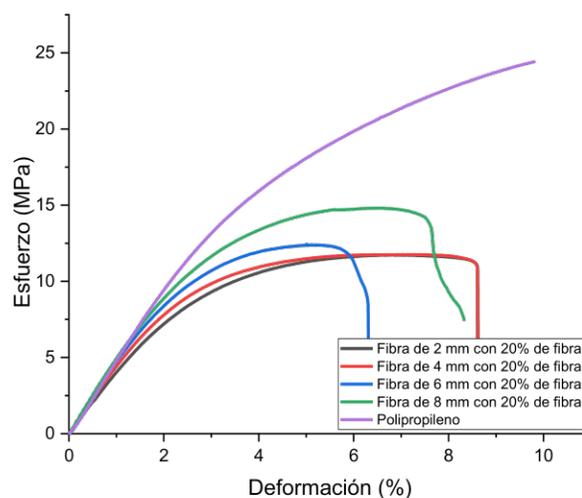


Figura 3. 7 Curvas típicas de esfuerzo-deformación de materiales compuestos en la dirección paralela a la extrusión.

Se puede observar que la adición de fibra modifica el comportamiento mecánico del material compuesto, haciéndolo más rígido indicado con el aumento en la pendiente inicial de las curvas esfuerzo-deformación de donde se obtiene el módulo de Young del material. Se observa una severa disminución de la deformación de ruptura de los materiales compuestos, con respecto a la del polipropileno, debido a que las fibras actúan como discontinuidades en la matriz de polipropileno, lo que resulta en una reducción de la elongación de la misma. Este comportamiento es característico de materiales compuestos termoplásticos con matrices dúctiles o elásticas [64].

En la tabla 3.3 y 3.4 se muestran los valores del módulo, resistencia y deformación obtenidos a partir de las curvas esfuerzo-deformación de los materiales compuestos, para las probetas cortadas en dirección longitudinal (paralela al flujo de extrusión) y en dirección transversal (perpendicular al flujo de extrusión). Se observa que al aumentar el contenido de las fibras en el material compuesto se obtiene un ligero incremento del módulo del material compuesto, pero a contenidos de 30% de fibra en la matriz los módulos de los materiales son muy similares, considerando la desviación estándar, independientemente de la longitud de la fibra. Por otro lado, se observa una disminución de la resistencia a tensión del material compuesto al aumentar el contenido de fibra en la matriz. Esta disminución es más notoria para las fibras de 6 mm, mientras que a porcentajes mayores la resistencia a la disminución es más pequeño.

Tabla 3. 3 Propiedades mecánicas de los materiales compuestos de forma longitudinal

Contenido de fibra (%)	Módulo a tensión (Mpa)	D.E	Resistencia a tensión (Mpa)	D.E	Deformación a ruptura (%)	D.E
(polipropileno)	464	37.3	34.9	2.43	300 >	1.4
Fibra de 2 mm de longitud promedio						
10	450.5	58.5	12.32	1.56	10	1.2
20	424.3	36.2	12.19	0.97	9.4	0.9
30	473.7	48.5	11.72	1.31	6.4	0.9
40	455.2	46.7	11.19	1.34	6.3	0.9
Fibra de 4 mm de longitud promedio						
10	408.8	16.1	13.48	0.92	11.9	1.7
20	469.0	49	13.33	1.16	9.2	0.9
30	466.7	41.7	11.90	0.71	6.7	0.7
40	445.4	23.5	9.87	0.39	5.1	0.3
Fibra de 6 mm de longitud promedio						

10	401.0	55.8	13.79	1.42	11.2	2
20	459.0	58.7	12.58	1.15	8.1	1.2
30	452.3	28.7	11.36	1.02	6.1	1.1
40	381.9	49.9	9.13	0.98	5.4	1
Fibra de 8 mm de longitud promedio						
10	461.3	25.4	15.51	0.94	9.5	1.7
20	417.2	58.7	12.46	1.56	7.6	1.2
30	453.6	31.8	12.63	1.38	6.8	1.0
40	495.6	28.1	13.44	0.93	5.8	0.8

Tabla 3. 4 Propiedades mecánicas de los materiales compuestos de forma transversales

Contenido de fibra (%)	Módulo a tensión (Mpa)	D.E	Resistencia a tensión (Mpa)	D.E	Deformación a ruptura (%)	D.E
Fibra de 2 mm de longitud promedio						
10	335.7	52.0	12.68	1.30	8.51	1.8
20	413.6	35.5	12.15	1.50	7.2	0.7
30	406.3	67.7	11.71	1.62	5.02	0.9
40	335.7	46.7	9.23	3.23	4.83	0.8
Fibra de 4 mm de longitud promedio						
10	370.6	15.3	11.27	0.68	7.46	1.7
20	326.0	37.3	10.53	0.73	6.29	1.3
30	353.4	12.2	8.66	0.33	4.90	0.7
40	342.6	33.3	7.54	0.40	4.11	0.3
Fibra de 6 mm de longitud promedio						
10	416.7	39.7	11.53	1.70	6.67	1.8
20	414.0	58.7	10.58	1.15	5.1	1.2
30	353.7	34.5	7.34	0.57	3.89	0.3
40	347.9	36.8	6.57	0.88	3.57	0.5
Fibra de 8 mm de longitud promedio						
10	430.0	20.8	12.99	0.91	6.52	0.7
20	377.6	34.9	9.35	1.03	5.34	1.04
30	363.7	36.6	8.87	0.51	5.23	1.3
40	307.7	58.2	7.20	1.13	4.45	0.4

Los valores de módulo y de resistencia a tensión de las probetas cortadas en la dirección transversal, fueron menores que los obtenidos de las probetas cortadas en dirección longitudinal, lo que se puede atribuir a que las fibras están alineadas a la dirección de flujo transfiriendo sus esfuerzos y como consecuencia teniendo un mayor efecto reforzante en dicha dirección. Las propiedades mecánicas son más altas en la dirección de flujo con respecto a la dirección transversal por lo tanto presentan un mayor efecto reforzante en

dicha dirección, esto es más evidente cuando usan fibras rígidas como las fibras de vidrio [66].

Debido a que el efecto del contenido de fibras, longitud de fibra y la dirección de flujo se muestran pequeñas variaciones en los parámetros mecánicos y para estudiar simultáneamente los factores (Longitud y Contenido de fibra), se realizó un análisis de varianza (ANOVA) que es útil para investigar los efectos de los factores individuales (efectos principales) así como también los efectos debido a las interacciones entre los factores. Los resultados se muestran en la Tabla 3.5. Se observa que el contenido de fibra fue significativo para los valores de módulo y deformación con valores de $P < 0.05$, mientras que la longitud no fue significativa para ningún parámetro mecánico.

El ligero efecto del contenido de fibra sobre el módulo del material compuesto obtenido en este trabajo en comparación con lo reportado en la literatura, en donde se observa un incremento de este valor en un 30% con 20% de contenido de fibra [66], se puede atribuir a la forma de obtenerlos materiales compuestos. Este comportamiento es característico de un material anisotrópico, ya que, durante el proceso de extrusión, las fibras tienden a orientarse en la dirección del flujo, y se obtiene un material en el que sus propiedades no son iguales en la dirección axial y en la dirección transversal. Por lo tanto, si el refuerzo está orientado de forma perpendicular a la aplicación de la carga, el fallo del material compuesto es controlado por la rotura o flujo de la matriz polimérica o por la descohesión fibra-matriz; el mecanismo exacto de fallo dependerá de la capacidad de deformación plástica de la matriz y de la resistencia de enlace fibra-matriz [66], mientras que en el caso de las fibras orientadas en la dirección al flujo las propiedades del material son determinadas por las propiedades mecánicas de la fibra.

Tabla 3.5 Análisis de varianza en Minitab (Anova de 2 vías) para el efecto de la longitud promedio y el contenido de fibra sobre las propiedades mecánicas en dirección paralela al flujo de los materiales compuestos obtenidos en este trabajo

ANÁLISIS DE VARIANZA DE TENSIÓN					
FUENTE	Grados de libertad (GL)	Suma de las desviaciones cuadráticas (SC)	Variación asociada al error experimental (MC)	Distribución (F)	(P) <0.05
CONTENIDO	3	24.16	8.05	9.51	0.004
LONGITUD	3	7.07	2.35	2.78	0.102
ERROR	9	7.62	0.84		
TOTAL	15	38.85			

ANÁLISIS DE VARIANZA DE DEFORMACIÓN

FUENTE	GL	SC	MC	F	P
CONTENIDO	3	60.11	20.03	32.96	0.000
LONGITUD	3	1.49	0.49	0.82	0.514
ERROR	9	5.47	0.60		
TOTAL	15	67.09			

ANÁLISIS DE VARIANZA DE MODULO

FUENTE	GL	SC	MC	F	P
CONTENIDO	3	1979	659.6	0.66	0.598
LONGITUD	3	2573	857.6	0.85	0.499
ERROR	9	9031	1003.4		
TOTAL	15	13582			

En la Tabla 3.6 se muestran las propiedades mecánicas cuando las láminas son molidas y moldeadas por compresión para un contenido de fibra del 10%. En este caso, no se observa un efecto de la longitud de fibra ya que durante el proceso de molienda se obtiene una disminución de la longitud promedio. Por otro lado, cuando los materiales compuestos se moldean por compresión las fibras se distribuyen al azar multiaxialmente por lo que tampoco se tiene un efecto de la orientación de las fibras.

Tabla 3.6 Propiedades mecánicas de los materiales compuestos con 10% de fibra y moldeados por compresión a partir de los laminados molidos

Longitud de fibra (mm)	Módulo a tensión (Mpa)	Resistencia a tensión (Mpa)	Deformación a ruptura (%)
Material compuesto por compresión	203.7+-10.3	29.85 ± 2.00	44.7+-4.8
Laminares 2	450.5+- 58.2	12.32 +-1.40	10+-1.2
Laminares 4	408.8+-16.1	13.48 +-1.10	11.9+-1.7
Laminares 6	401+-55.8	13.79 +- 1.70	11.2+-2
Laminares 8	461.3+-25.4	15.51 +-1.60	9.5+-1.7

3.2.3 Micrografías SEM de los materiales compuestos

En las micrografías SEM (Figura 3.8) se observa, en la zona de fractura transversal de las probetas con fibras de 2 mm de longitud, la presencia de fibras saliendo de la matriz o una rupturade las fibras en la superficie de la matriz, lo que es indicativo de que hay adhesión entre la fibray la matriz. El número de fibras se incrementa conforme aumenta el contenido de fibras. También se observa la presencia de huecos debido burbujas de aire formadas

durante el proceso de extrusión y que podrían ser las causantes de las bajas resistencia a tensión que presentaron los materiales.

En la zona de fractura longitudinal, se aprecia, secciones más largas de fibras saliendo o sobre la superficie de la matriz, lo que confirma que las fibras se orientan en la dirección de la extrusión. La presencia de fibras fracturadas a lo largo de su sección longitudinal indica que el copolimero de PPAM reacciona principalmente en la superficie de las fibras, obteniéndose una buena adhesión fibra-matriz a lo largo de la fibra.

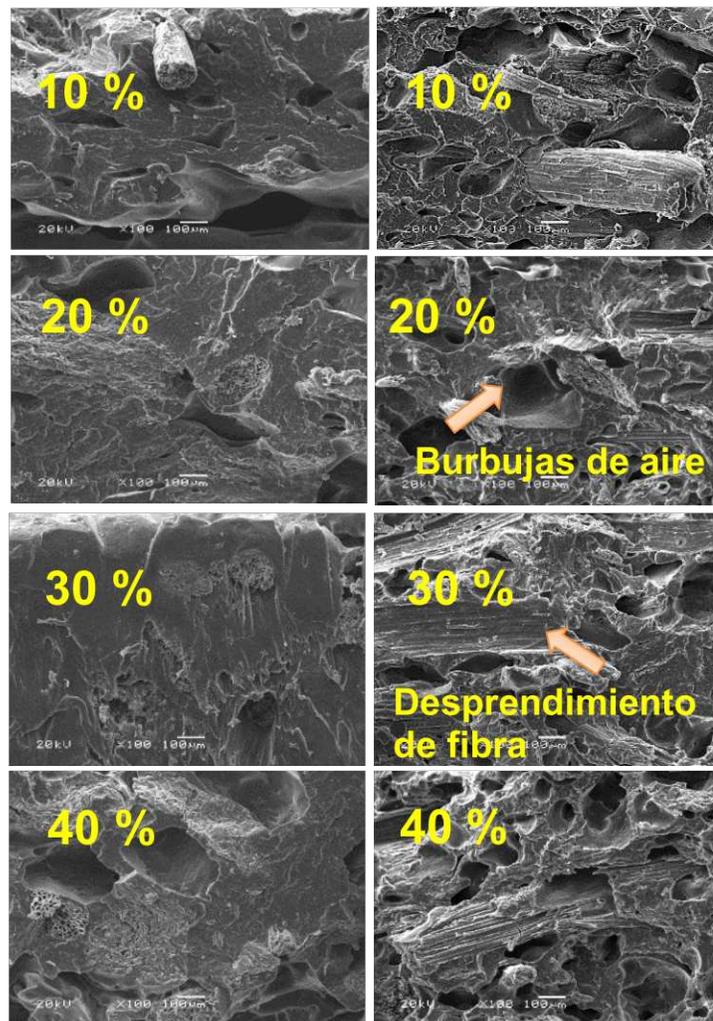


Figura 3. 8 Micrografías SEM de los perfiles de materiales compuestos con fibra de 2 mm de longitud promedio y diferente contenidos de fibra. Izq. Corte sección transversal y der. Corte longitudinal.

3.2.4 Propiedades reológicas

Los estudios de las propiedades reológicas de los materiales compuestos nos permiten conocer el efecto de las cargas o refuerzo sobre el flujo de los materiales durante su procesamiento [74]. En la Figura 3.9 se muestra la variación de la viscosidad compleja con la frecuencia para materiales compuestos con diferente concentración de fibra y diferente longitud. Los valores de η^* fueron para 10 % de fibra de 9,000 a 800 Pa.s, para 20% de fibra de 20,000 a 3,000 Pa.s, para 30% de fibra de 30,000 a 4,000 Pa.s y para 40% de fibra de 50,000 a 6,000 Pa.s. Además, la viscosidad compleja de los compuestos PP/Fibra fue mucho mayor que el polipropileno puro. Este fenómeno probablemente se debió a la restricción de los movimientos del segmento de la cadena del polipropileno a medida que la cantidad de fibra aumentaba. Como se ve en Figura 3.9, el aumento de la viscosidad compleja fue más predominante a frecuencias angulares más bajas que la región de frecuencias angulares más altas. Es porque a frecuencias angulares más altas, las fibras se alinearán fuertemente junto con la matriz. Por lo tanto, la probabilidad de colisión fibra-fibra era mucho menor, razón por lo que la viscosidad compleja fue menor a mayor frecuencia angular.

La viscosidad compleja más alta se registró cuando se añadió un 40% de fibra. Así mismo, se observa que conforme se disminuye la longitud de la fibra se obtiene aumento de la viscosidad compleja. Esto se podría deber a que al disminuir la longitud fibra de 8mm a 2mm, para un mismo contenido de fibras, el número de partículas incrementa. Se observa una disminución constante en la viscosidad compleja de todas las muestras con el aumento de la frecuencia, lo que indica que los materiales presentan un comportamiento de adelgazamiento por cizallamiento (pseudoplasticidad) [75].

En la Figura 3.10 se muestran las curvas de módulo de almacenamiento contra frecuencia para los materiales compuestos obtenidos con diferente contenido y longitud de fibras. Se observa que la adición de fibras incrementa el módulo de almacenamiento de los materiales compuestos con respecto a la matriz, indicando una mayor rigidez de los materiales compuestos. También se observa un ligero incremento del módulo con respecto a la frecuencia. Este comportamiento se atribuye a que, en la mezcla en fundido, las fibras se aglomeran al incrementar el contenido y longitud de fibra. En otras palabras, al incrementar la concentración de fibra en la mezcla, la discontinuidad debida a las fibras aumenta y debido a la diferente movilidad entre la fibra y la matriz, se produce la migración de la matriz hacia los platos, dando como resultado una superficie de acabado lisa en la superficie.

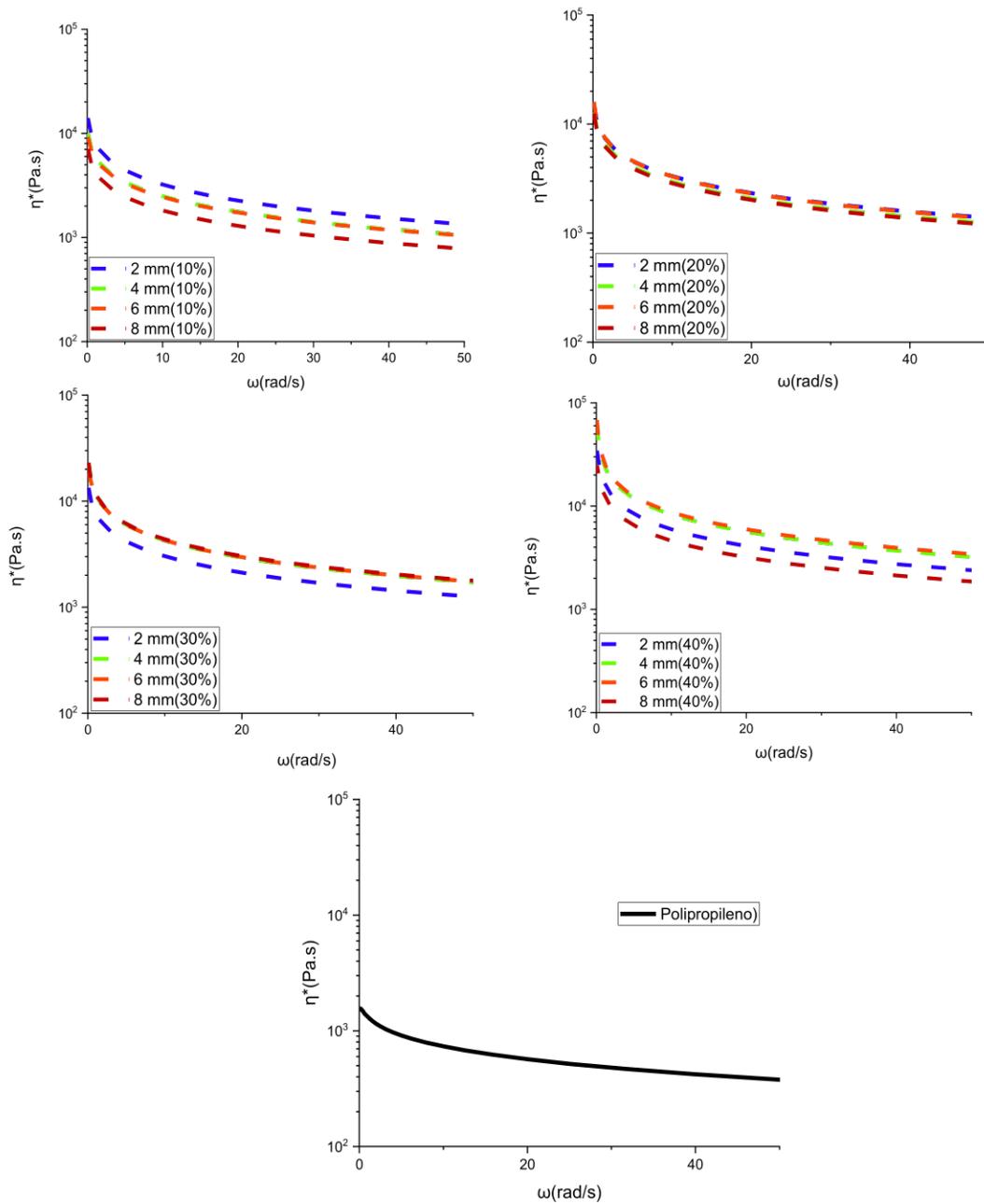


Figura 3. 9 Efecto de la longitud promedio sobre la viscosidad compleja a diferentes concentraciones de fibra.

Las diferencias en el módulo de almacenamiento de los materiales se podrían atribuir a los diferentes tamaños de la fibra debido a la rigidez que transfiere la fibra al material compuesto. Claramente, a medida que aumentaba la velocidad de corte, este efecto se volvió menos marcado, lo que sugiere que cualquier interacción fibra-fibra era relativamente

débil y se rompe a altas velocidades de corte [76].

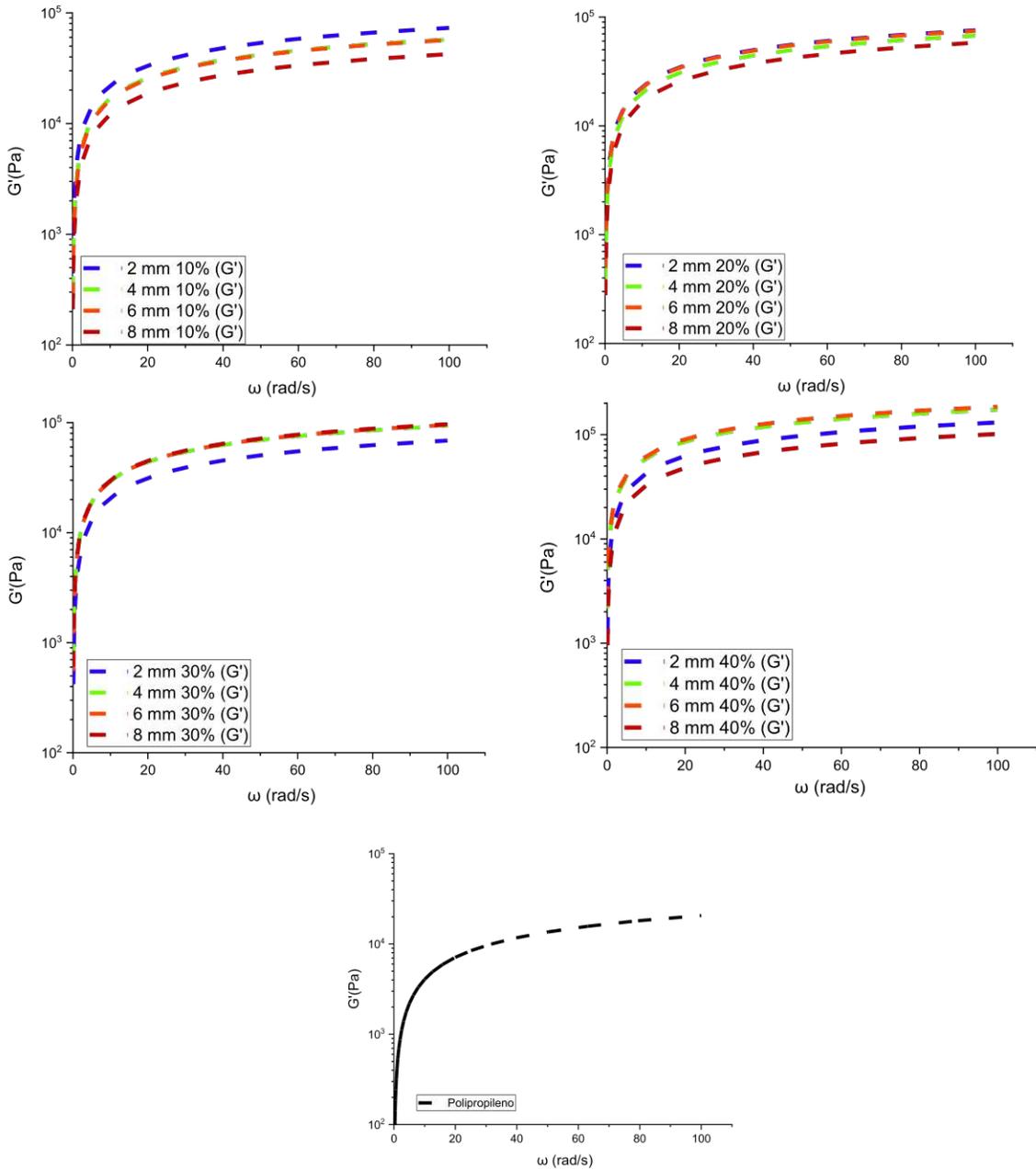


Figura 3. 10 Efecto de la longitud promedio sobre el módulo de almacenamiento a diferentes concentraciones de fibra.

La variación del módulo de pérdida con el contenido y longitud de fibra se muestra en la Figura 3.11. El módulo de pérdida aumenta conforme se incrementa la frecuencia angular y el contenido de fibra. Los altos valores de G' y G'' registrados con el 40 % de fibra y 6 mm

de longitud pueden explicarse en términos de una mejor dispersión de la fibra, una buena adhesión interfacial entre la fibra y la matriz debida al enredamiento polimérico entre las cadenas del PP y el copolímero a la fibra [76].

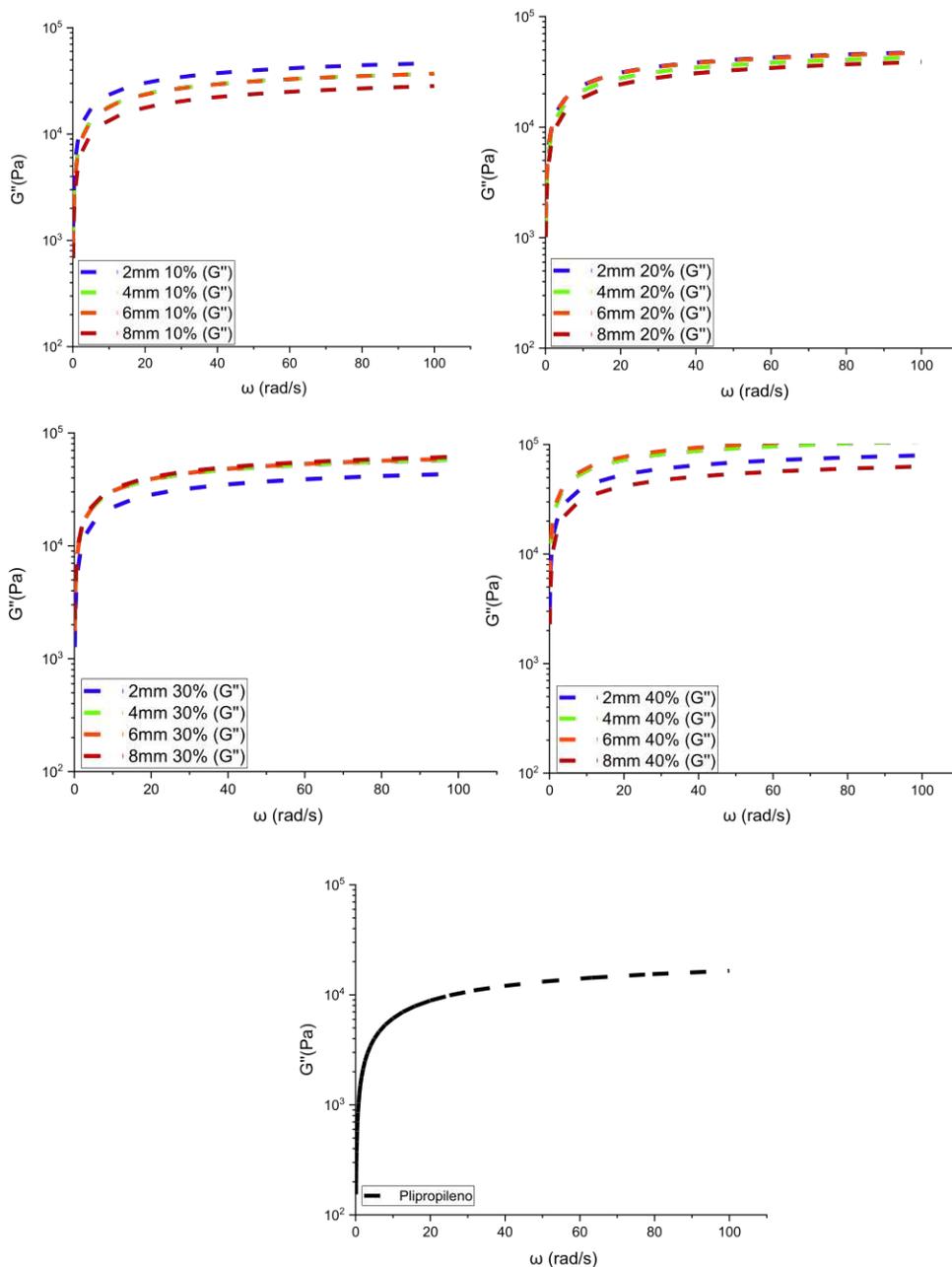


Figura 3. 11 Efecto de la longitud promedio sobre el módulo de pérdida a diferentes concentraciones de fibra.

Los resultados hasta ahora indican que el contenido a partir del 10 y 20 % de fibra modifica las propiedades mecánicas a tensión de los materiales compuestos, pero si se aumenta la concentración a un 30 y 40% las propiedades mecánicas bajan debido a que se cuenta con mayor interacción Fibra-Fibra, de igual forma los resultados reológicos indica que al aumentar el contenido la viscosidad aumenta causando problemas a la hora de procesar el material en el extrusor, así que se seleccionó una sola concentración (20% de fibra). La longitud hasta ahora no contribuye como reforzante, pero para procesar el material compuesto se decidió experimentar con 3 longitudes distintas (2, 6 y 8 mm) para saber si aun así pudiera reforzar el material compuesto

3.3 Obtención y Caracterización del perfil rectangular

En la Figura 3.12 se puede apreciar el perfil rectangular obtenido mediante extrusión de las fibras del bagazo de henequén y la matriz de polipropileno. A partir de los resultados anteriores, se seleccionaron las formulaciones con 20% de contenido de fibra y longitudes de 2, 6 y 8 mm para la obtención de éstos perfiles. Los perfiles mostraron una superficie lisa y una distribución homogénea de las fibras en el perfil.

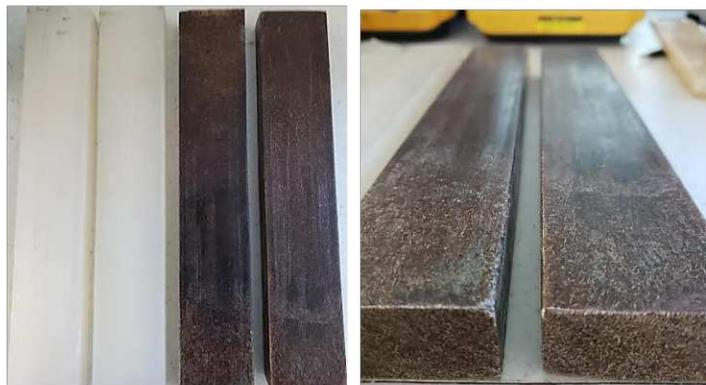


Figura 3. 12 Perfil rectangular de PP y del material compuesto con fibras de bagazo de henequén y matriz de PP

3.3.1 Morfología del perfil (SEM)

En la Figura 3.13 se muestra las micrografías SEM de la sección transversal y longitudinal de los perfiles obtenidos con el 20% de fibras. Se puede observar que la matriz de PP presenta una ruptura típica de un material dúctil. La morfología de las sección transversal y longitudinal delos perfiles con fibras de 2 mm son similares, esto es, en ambas se aprecian fibras rotas pegadas a la matriz y fibras emergiendo de la misma. La morfología de los perfiles con fibras de 6 mm se aprecia que la sección transversal es muy similar a la del perfil con fibras de 2 mm mientras que la sección longitudinal muestra fibras alineadas a la dirección de flujo del material fundido. Este comportamiento se podría deber a la mayor movilidad de las fibras de 2 mm durante el llenado del molde del perfil, lo que permite su orientación en todas direcciones; mientras que, debido a lamenor movilidad de las fibras de 6 mm durante el llenado del molde, éstas mantienen su orientación en la dirección de flujo del material fundido.

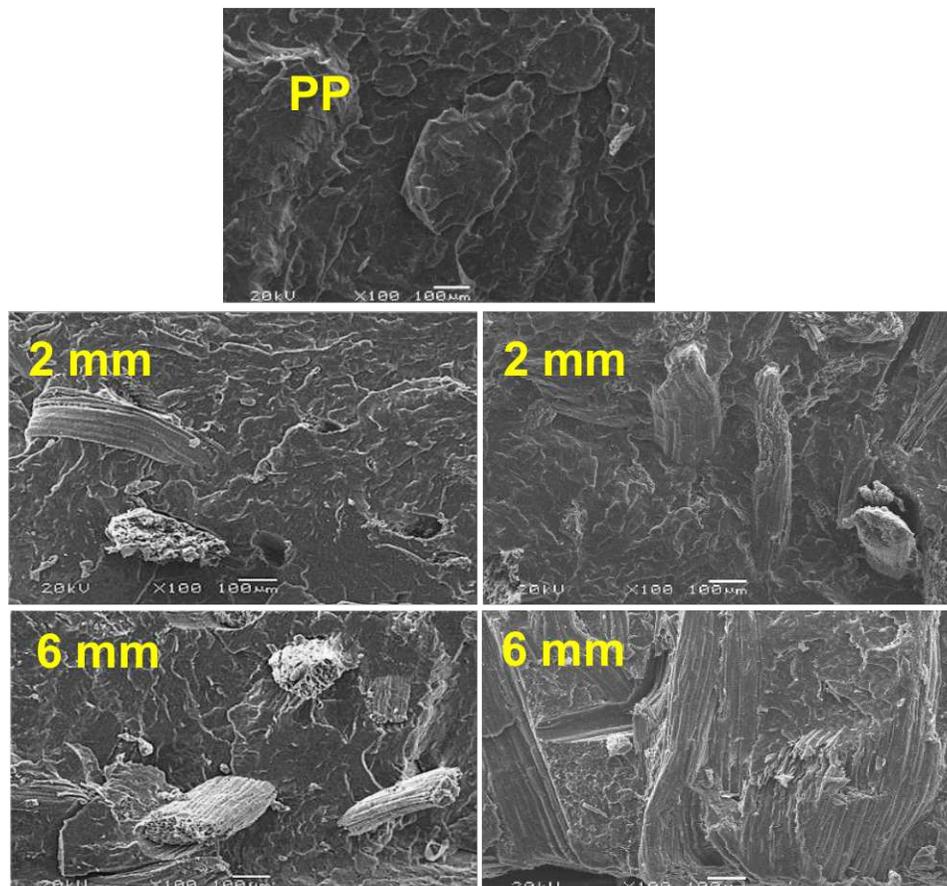


Figura 3. 13 Micrografía de SEM de la sección transversal (izquierda) y longitudinal (derecha) de los perfiles rectangulares.

3.3.2 Calorimetría Diferencial de Barrido del perfil

En la Figura 3.14 se muestran los termogramas DSC de los materiales compuestos y en la Tabla 3.7 las temperaturas de cristalización y de fusión de dichos materiales. Se observa que la temperatura de fusión y de cristalización de los materiales compuestos disminuye ligeramente con respecto al del PP, mientras se tiene un aumento de la cristalinidad. El incremento en la cristalinidad al adicionar fibra, se debe a que la superficie de la fibra actúa como sitio de nucleación para la cristalización. Por otro lado, a concentraciones mayores del 20% de fibra el movimiento de las cadenas poliméricas está más restringido, por lo que se generan cristales de diferentes tamaños, lo que resulta en la disminución tanto la temperatura de fusión como a la cristalización con respecto a las del polipropileno. No se observa un efecto de la longitud sobre las propiedades térmicas de los materiales compuestos,

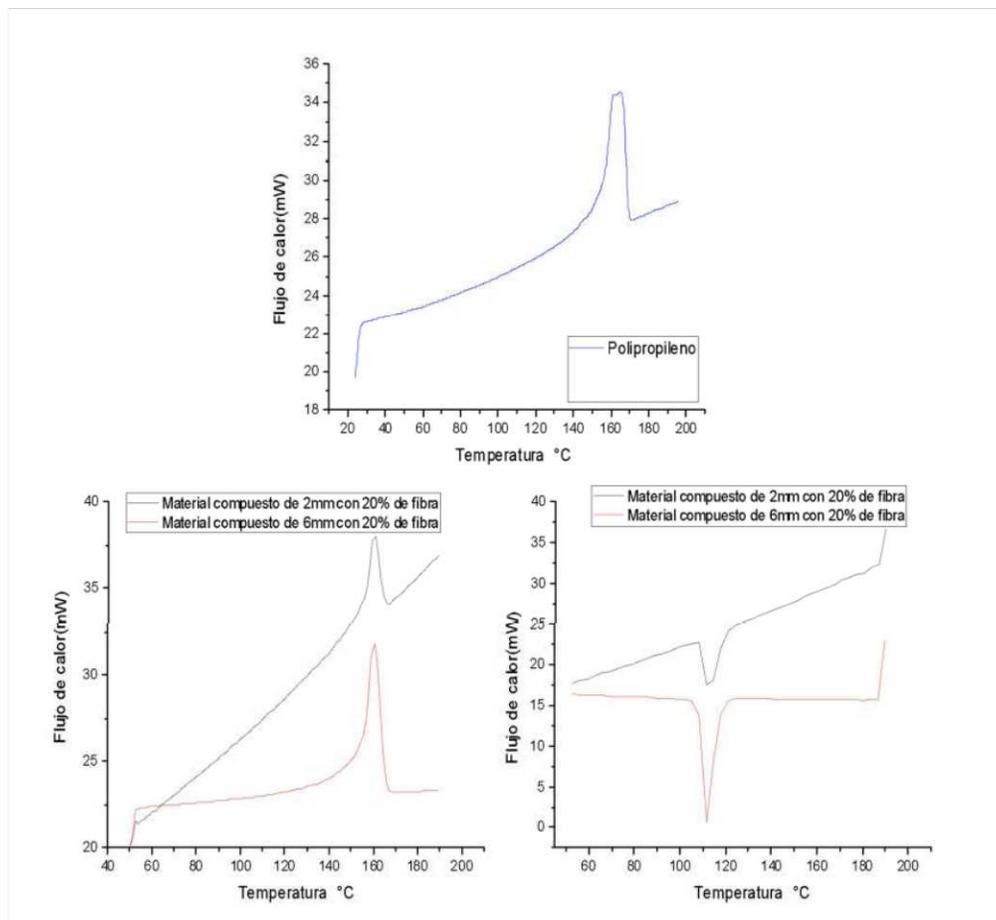


Figura 3. 14 Efecto de la longitud de fibra sobre las curvas de DSC de los materiales compuestos.

Tabla 3.7 Propiedades térmicas de los materiales compuestos con 20% de fibra.

Longitud de fibra (mm)	Temperatura de cristalización (°C)	Temperatura de fusión (°C)	X _c (%)
Polipropileno	114.2	164.8	49.6
2	111.6	160.5	51.9
6	111.6	160.5	51.9

3.3.3 Propiedades mecánicas a flexión

Las pruebas a flexión se realizaron de acuerdo a lo establecido a la norma ASTM D790, por lo tanto, se eligieron 6 probetas por longitud de fibra (2 y 6 mm) con el mismo contenido (20%). En la Figura 3.15 se muestran algunas de las probetas elaboradas para los ensayos a flexión, así como sus dimensiones.



Figura 3. 15 Probetas elaboradas para los ensayos a flexión

En la Figura 3.16 se presentan las curvas esfuerzo-deformación de las pruebas de flexión de los materiales compuestos elaborados con 20% de fibras y diferentes longitudes de fibra, mientras que en la Tabla 3.8 se reportan las propiedades mecánicas a flexión. Se observa que los valores de esfuerzo fueron mayores en comparación al de la matriz, para longitudes de fibra de 6 y 8 mm, obteniendo valores de resistencia a flexión de 55 y 71 MPa, respectivamente al 5% de deformación. También se observa un incremento del módulo a flexión al aumentar la longitud de la fibra concluyendo que esta vez la longitud está actuando como reforzante en el material compuesto. Los perfiles con fibras de 2 mm de longitud presentaron valores de resistencia y de módulo menor que la matriz, lo que se podría deber a la mayor orientación de estas fibras, lo que resulta en una menor resistencia a flexión en la dirección de aplicación de la carga.

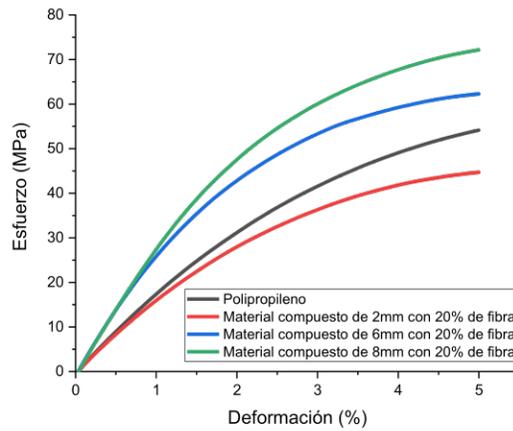


Figura 3. 16 Curvas esfuerzo-deformación de las pruebas de flexión de los perfiles rectangulares con 20% de fibras

Tabla 3.8 Propiedades mecánicas a flexión de los perfiles de material compuesto

Longitud de fibra (mm)	Módulo a flexión (MPa)	Resistencia a flexión (Mpa)
Polipropileno	896.5 ± 0.7	46 ± 2.2
2	571.8 ± 0.2	28 ± 1.3
6	1100 ± 0.5	55 ± 2.0
8	1170 ± 0.4	71 ± 2.8

Conclusiones

Con base a los resultados obtenidos en el trabajo se tienen las siguientes conclusiones:

La composición química de los componentes del bagazo de henequén (fibras y pulpa o fracción no fibrosa) fue muy similar a la composición de las fibras de henequén que se obtiene del desfibrado de las obtenidas de las hojas de las plantas. Se obtuvo un contenido de celulosa mayor del 77% por lo que estos materiales podrían ser una fuente de celulosa. La morfología irregular de la pulpa y su menor estabilidad térmica, puede afectarse su uso en la obtención de materiales compuestos. Por otro lado, las fibras obtenidas del bagazo pueden ser usadas en la obtención de materiales compuestos, siendo necesario su reducción de tamaño para su aplicación en procesos continuos como la extrusión. Las fibras obtenidas del bagazo de henequén presentaron propiedades mecánicas más bajas que las fibras de henequén comerciales, debido a la degradación durante el desfibrado mecánico. Un aumento en el contenido de fibras en los materiales compuestos reduce la ductilidad de la matriz, obteniendo un material con comportamiento más rígido en comparación con la matriz de polipropileno. La longitud de la fibra no afecta en forma significativo las propiedades a tensión de los materiales compuestos obtenidos, en forma de láminas delgadas y las propiedades mecánicas a tensión fueron menores en la dirección transversal con respecto a la dirección de la extrusión indicando una orientación preferencial de las fibras en ésta última dirección.

El contenido y longitud de fibra influyen en el procesamiento del perfil cambiando sus propiedades viscoelásticas. El mayor número de partículas al aumentar el contenido de fibra o al disminuir el tamaño favorece la interacción fibra-fibra lo que incrementa la viscosidad del sistema.

El encapsulamiento de las fibras por la matriz de polipropileno resulta en una mejor estabilidad térmica de las fibras, al mismo tiempo que se actúan como sitios de nucleación para la cristalización, obteniéndose un incremento de cristalinidad con el contenido de fibra.

Se obtuvo un perfil rectangular, de 40 cm de largo por 5 cm de ancho y 2 cm de espesor mediante el llenado de un molde de perfil de PTR con dimensiones 5.08 cm x 2.54 cm. En este tipo de perfil, la longitud de las fibras influye en las propiedades mecánicas a flexión. Se obtuvieron mejores propiedades cuando se usaron las fibras con longitudes promedio de 8 mm.

Recomendaciones y Trabajo Futuro

Con base a los resultados obtenidos en este trabajo, se recomienda lo siguiente:

- Darles un pretratamiento alcalino a las fibras para remover residuos depositados sobre su superficie; hacer más rugosa la superficie al remover parte de la lignina y hemicelulosa superficial e inducir un amarre mecánicos de las fibras con la matriz.
- Obtener primero pellets de los materiales compuestos para mejorar la dispersión de las fibras en la matriz y obtener un perfil más homogéneo.

Como trabajo futuro se propone usar. Y en su caso modificar, los dados formadores de perfiles con los que cuenta el CICY, a fin de obtener los perfiles en forma continua de tal forma que se puedan tener diferentes longitudes de perfil.

Bibliografía

1. L.H. Velázquez-Jiménez; A. Pavlick; J.R. Rangel-Méndez, Chemical characterization of raw and treated agave bagasse and its potential as adsorbent of metal cations from water. *Industrial Crops and Products*, 43, 200-206, 2013.
2. A. Allwyn, T. Vasudeva. A review on cellulose and its utilization from agro-industrial waste. *Drug Invention Today*, 10, 1-7, 2018.
3. E. Hafemann, R. Battisti, R. Machado, Valorization of royal palm tree agroindustrial waste by isolating cellulose nanocrystals. *Carbohydrate Polymers*, 218, 188-198, 2019.
4. J. Fiorelli, R. Galo, S. L. Castro Junior, U. Belini, P. Lasso, H. Savastano Jr. Multilayer Particleboard Produced with Agroindustrial Waste and Amazonia Vegetable Fibres. *Waste Biomass Valor*, 9, 1151–1161, 2018.
5. R.Panesar, S. Kaur. P. Panesar. Production of microbial pigments utilizing agro-industrial waste: a review. *Current Opinion in Food Science*, 1,70-76, 2015.
6. E. Chiellini, P. Cinelli, L. Mao. Composite Films Based on Biorelated Agro-Industrial Waste and Poly (vinyl alcohol). Preparation and Mechanical Properties Characterization. *Biomacromolecules*, 2, 1029-1037 ,2001.
7. M. Martinez, Katia, V Olivero. Residuos agroindustriales su impacto, manejo y aprovechamiento, *Revista colombiana de ciencia animal*, 9, 122-132, 2017.
8. Y. Vargas, L. Pérez, Aprovechamiento de residuos agroindustriales para el mejoramiento de la calidad del ambiente. *Revista Facultad de Ciencias Básicas de la Universidad Militar Nueva Granada*, 12, 59-72, 2018.
9. H. Cázares, A.S, L. Real, Delgado, Residuos agroindustriales con potencial de compostaje. *Agroproductividad*, 9, 10-17, 2016.
10. L. Ancona, D. Salmones. Nota corta uso del bagazo del henequén fermentado en cultivo de volvariella. *Revista Mexicana de Micología*, 12,115-118, 1996.
11. SADER, Actualización de la superficie de henequén en el estado de Yucatán. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/451423/Publicaci_n_16_-_Utilidad_de_la_Frontera_Agr cola_en_el_estado_de_Yucat_n.pdf. (Acceso 22 de mayo 2022).
12. R. Sanginés García, B. Carrasco, L. Martínez, E. Salinas. Composición proximal del bagazo de henequén y su uso en la alimentación de borregos. *Revista Mexicana de Ciencias*

- Pecuarias, 31, 75-78, 1976.
13. H. Vega, U. Ramírez, O. Jiménez. Desarrollo de materiales laminados de fibra de henequén-resina poliéster en Ciencias de la Ingeniería y Tecnología Handbook T-V. M. Ramos, V. Aguilera (Eds.), Ecorfan, México, 94-105, 2014.
 14. G. Pravin, M. Prakash, & B. Vaishali. Surface Treated and Untreated Henequen Fiber Reinforced Polypropylene Composites. International Journal of Chemical, Environmental & Biological Sciences, 2, 181-186, 2014.
 15. A. Castillo, P. González, Caracterización termo-mecánica de biolaminados epoxy/henequén. Revista de la asociación Española de materiales compuestos, 4, 1-5, 2020.
 16. W. Mora, B. Ramón, G. Moreno. Fibras Naturales como alternativa de refuerzo en materiales compuestos. Una revisión. Revista de la facultad de ciencias básicas de la Universidad de Pamplona, 17, 60-72, 2019.
 17. R. Soto, M. Lavinia. Fabricación de compuesto de matriz epoxi reforzado con fibras largas de henequén orientadas aleatoriamente. Ingeniería Mecánica. Vol. 18. No. 2, mayo-agosto, 2015, p. 122-128.
 18. D. Díaz, W. Saint. Perfiles a partir de fibras de henequén con matriz de polietileno de alta densidad. Ciencias Técnicas Agropecuarias, 27 (1), 22-35, 2018.
 19. R. Raygoza, J. Gastinel. Efecto de la fibra de agave de desecho en el reforzamiento de polipropileno virgen o reciclado. Revista Mexicana de Ingeniería Química, 8 (3), 319- 327, 2009.
 20. L. Valle. Aprovechamiento de desechos lignocelulósicos derivados de la producción industrial de aceite de palma en el desarrollo de materiales compuestos. Tesis doctorado. Centro de Investigaciones Aplicadas a Polímeros, Escuela Politécnica Nacional, Quito-Ecuador, 2019.
 21. C. Navas, Compuestos poliméricos reforzados con desechos agroindustriales regionales. Tesis doctorado. Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de San Juan, Argentina, 2019.
 22. M. Brizuela, O. Guillen y G. Hernández. Aprovechamiento de los residuos agroindustriales y su contribución al desarrollo sostenible de México, Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales, 2, 27-41, 2016.
 23. P. Nilda. Valoración del biocombustible obtenido mediante fermentación de residuos agroindustriales. Tesis Licenciatura, Universidad científica del sur. Lima, Perú, 2020.

24. E. Cabrera, V. Fernández, A. Pérez y D. Ramírez. Caracterización de residuos agroindustriales con vista a su aprovechamiento, *Revista Centro Azúcar*, 43, 1-9, 2016.
25. E. Silva. Obtención de un biopolímero a partir del bagazo residual del agave mezcalero. Tesis de maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo, México, 2020.
26. A. Espinoza Zamora, G. Orozco Benítez, Y. Vázquez López, J. Romo Rubio, F. Escalera Valente, S. Martínez González Una revisión sobre la pulpa de naranja: cantidad, composición y usos. *Revista Abanico Agroforestal*.1, 1-14, 2019.
27. A. Rodríguez. Caracterización química de biomasa y su relación con el poder calorífico. Tesis de Maestría, Universidad de Oviedo, España, 2013.
28. R. Guerrero, L. Valenzuela. Agroindustria y medio ambiente. Trilogía. *Ciencia Tecnología Sociedad*, 23 (33), 63-83, 2011.
29. A. Saffe, A. Fernández, G. Mazza y R. Rodríguez. Prediction of regional agro-industrial wastes characteristics by thermogravimetric analysis to obtain bioenergy using thermal process, *Energy Exploration & Exploitation*, 37(1), 544–557,2019.
30. P. Gañán, R. Zuluaga, C. Castro. Celulosa: un polímero de siempre con mucho futuro. *Revista Colombiana de Materiales*, 1, 1-4. 2017.
31. M. Chávez. La biomasa: fuente alternativa de combustibles y compuestos químicos, *Anales de química*, 115(5) ,399-407.2019.
32. M. Arredondo & G. Vázquez. Pared celular de las plantas: Función, estructura y aplicaciones, *Biotecnología*, 1, 115-124, 2016
33. A.Sundarraj, T. Ranganathan. A review on cellulose and its utilization from agro-industrial waste, *Drug Invent Today*, 10, 81-94, 2018.
34. M. Siqueira & B.Conti. Brazilian Agro-industrial Wastes as Potential Textile and Other RawMaterials: a Sustainable Approach, *Materials Circular Economy*, 4, 1-21, 2022.
35. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. <https://www.gob.mx/siap/articulos/henequen-el-oro-verde-yucateco?idiom=es>. (Acceso 27 mayo 2022).
36. J. Valin, Y. Guerra.Caracterización de la interface de material compuesto de matriz poliméricatermofija reforzada con fibras de henequén cubano, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 26,26-39, 2017.
37. V. Naik & M. Kumar. A Review on Natural Fiber Composite Materials in Automotive Applications, *Engineered Science*. 18, 1–10, 2022.
38. S. Mosisa, T. Batu. Investigation of mechanical properties of bamboo/sisal fiber reinforced

- hybrid composite materials, *Material Science & Engineering International*. 5, 2-7, 2021.
39. A. Rondón, A. Valle, G. Milián y F. Arteaga. Obtención de un biopreparado simbiótico (mezcla de pulpa de *Agave fourcroydes* Lem. y PROBIOLACTIL®) para su aplicación en terneros, *Revista Agrisost*. 25, 1-9, 2019.
 40. L. Tong & K. Bannister. *3D Fibre Reinforced Polymer Composites*, 1da ed.; Elsevier Science Internet Homepage, London, 2002, Vol 1, 1-255.
 41. Y. E. Chávez. Comportamiento mecánico de materiales compuestos tipo panel en aplicaciones estructurales para zonas sísmicas. Tesis Maestría. Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. México, 2021.
 42. T. Yashas, M. Sanjay, K. Bhat, & P. Madhu. Polymer matrix-natural fiber composites: An overview. *Cogent Engineering*. 5, 1-14, 2018.
 43. Y. Wang & K. Song. Microstructure evolution mechanism near the fracture lip of 4Cr5MoSiV1 steel during deforming at 580 °C. *Journal of Materials Research and Technology*. 8, 6390–6395, 2019.
 44. F. Rubino, A. Nisticò. Marine Application of Fiber Reinforced Composites: A Review. *Marine Science and Engineering*. 8, 2-29, 2020
 45. T. Starr. *Composites a profile of the worldwide reinforced plastics industry, markets and suppliers* 3a. edition. Elsevier Science, London, 2005, 1-294.
 46. J. Hoheneder, I. Flores-Vivian, L. Vergara Alvarez, K. Sobolev. Desempeño de compuestos con fibras de alcohol polivinílico y nano-fibras/tubos de carbono. V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales. Valencia, España, 2018, 1-7.
 47. G. Uribe. Monitoreo de salud estructural en materiales compuestos fibrorreforzados utilizando nanoestructuras jerárquicas de carbono, Tesis de Maestría, Centro de Investigación Científica de Yucatán, 2021.
 48. D. Gay, V. Suong. *Composite materials*, 4ta ed.; CRC Press, Washington, 2003, Vol 4, 1-523.
 49. M. Herrera. Estudio de la incorporación de nanotubos de carbono en las propiedades interfaciales al cortante de un material compuesto multi-escala de resina epóxica reforzada con fibras de carbono. Tesis de Maestría, Centro de Investigación Científica de Yucatán, 2017.
 50. H. Guillermo. Fibras naturales y compuestos reforzados con fibras naturales: la motivación para su investigación y desarrollo. *Revista Materia*. 24, 1-3. 2019.

51. F. Curicama, L. Guallasamin. Desarrollo de nuevos materiales compuestos reforzados con fibras naturales y sintéticas, *Sucre Review*. 2,1-14. 2019.
52. B. Enciso, J. Abenojar. M. Martínez. Cinética de descomposición y estimación de vida en servicio de materiales compuestos termoplásticos reforzados con fibras naturales, *Asociación Española de Materiaes Comuestos*, 5,23-26. 2019.
53. A. Bledzki, J. Gassan, W. Zhang. Impact properties of natural fiber-reinforced epoxy foams, *Journal Cellular Plastic*. 35, 550-562, 1999.
54. Y. Girijappa, S. Rangappa. Natural Fibers as Sustainable and Renewable Resource for Development of Eco-Friendly Composites: A Comprehensive Review, *Frontiers in Materials*. 6, 1-14, 2019.
55. E. Llanes, D. Zurita, M. Tambo. Caracterización mecánica a flexión de materiales compuestos con matriz fotopolimérica reforzados con fibras de abacá y cabuya mediante impresión 3D, *Ingenius*. 3, 100-112. 2019.
56. S. Suárez, B. Valencia. Caracterización dinámica vibratoria experimental de compuestos reforzados con fibra natural de fique. *Revista Chilena de Ingeniería*. 28, 304-314. 2020.
57. T. Hassan & H. Jamshaid. Acoustic, Mechanical and Thermal Properties of Green Composites Reinforced with Natural FibersWaste. *MDIP Polymers*. 12, 1-19, 2020.
58. D. Batista, W. Valdés, V. Téllez. Perfiles a partir de fibras de henequén con matriz de polietileno de alta densidad, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 27, 22-35. 2018.
59. A. Soto, J. Rivera, D. Díaz. Desarrollo de un material compuesto de fibras de henequén utilizando una matriz termofija, *Ingeniería Mecánica*. 17, 264-272, 2014.
60. M. Acevedo & M. Luna. Tratamientos químicos superficiales para el uso de fibras naturales en la construcción: concretos y morteros. Tesis de licenciatura. Universidad de Cartagena, Colombia, 2021.
61. J. Agassant, P. Avenas, J. Sergent; P. Carreau. *Polymer processing principles and modeling*, 2da ed., Hanser, New York, 1991, Vol 15, 1-60.
62. I. Quintal. Obtención de materiales compuestos de fibras de agave y polipropileno, para su aplicación en la obtención de láminas acanaladas. Tesis de Maestría, Centro de Investigación Científica de Yucatán, México, 2012.
63. A. Marcalla, A. Coyago. Materiales compuestos de polímero reforzado con fibra de cabuya y coco aplicado al sector automotriz, *Ciencias Técnicas y Aplicadas*. 7, 436-465. 2021.
64. C. Yepes, O. Cobos. Caracterización mecánica de un material compuesto cedro rojo - polietileno de baja densidad, *Ingeniería y competitividad*. 24,1-11. 2022.

65. C. Viteri. Diseño y construcción de una máquina de termoformado por compresión para la fabricación de cubrebocas, controlado mediante un sistema neumático, para la micro empresa Tejidos Martínez. Tesis licenciatura, Universidad de la Fuerzas Armadas, Ecuador, 2019.
66. E. Sánchez, A. Jiménez. Caracterización de un material compuesto de matriz poliéster reforzada con fibra de yute precargada mediante moldeo por compresión. Tesis de licenciatura, Escuela Politécnica Nacional de Quito, Ecuador, 2019.
67. E. Martí. Proceso de inyección en el plástico. [En línea]. 2021. [Consulta: 29 de mayo de 2022]. Disponible en: <https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/326284-Proceso-de-inyeccion-en-el-plastico.html>
68. A. Fernández, M. Muro, J. Aldareguia. Fabricación de material compuesto de fibra larga reciclada de carbono mediante inyección, Revista de la Asociación Española de Materiales Compuestos. 3,105-111. 2019.
69. F. Moscoso, A. Alvarado, L. Martínez, R. Hernández, V. Escamilla & G. Canche. The effects of Henequén Cellulose Treated With Polyethylene Glycol on Properties of Polylactic Acid Composites. Bioresources. 14(2), 2707-2726. 2019.
70. A. Dzul. Efecto de un agente de acoplamiento natural sobre las propiedades mecánicas de un material compuesto polipropileno/henequén. Tesis de Maestría, Centro de Investigación Científica de Yucatán, México, 2015.
71. J. Arellano, A. González, M. Tiznado, L. Zacarías. Composición, fisiología y biosíntesis de la cutícula en plantas. Reviata Fitotecnia Mexicana. 36, 3-12. 2013.
72. M. Reyes. Principales características de los productos obtenidos del proceso hidrotérmico solar con bagazo de agave angustifolia. Tesis de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México, 2022.
73. L. Castillo, A. Larqué, I. Higuera. CICY: Treinta años de labor científica y educativa, México, Vol. 1, 1-416, 2010.
74. R Simba, O. Sánchez. Caracterización de un material compuesto de polipropileno reforzado con cascarilla de arroz obtenido por extrusión. Tesis de Ingeniería, Escuela Politécnica Nacional, Quito-Ecuador, 2019.
75. D. Puerta, N. Porras & M. Arias. Desarrollo y caracterización de un material compuesto obtenido a partir de los desechos del plátano verde (Musa paradisiaca). Proyecto de grado, Universidad de los Andes, Colombia, 2019.
76. S. Pech. Obtención y modificación de nanocristales de celulosa de residuos de agave

tequilana weber para la producción de nanorefuerzos para poli (ácido láctico). Tesis de Doctorado, Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.2018.