

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas

Caracterización de un compuesto de polietileno de baja densidad
reforzado con fibra de banano para su uso en extrusión de película
soplada

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Químico

Presentado por:

Santiago Enrique Corral Santos

Roddy Alberto Barcia Mero

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2022

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mi familia, que me han apoyado durante toda mi carrera

Santiago Corral Santos

A todo aquel que confió y creyó en mí, esto es para ustedes.

Roddy A. Barcia Mero

AGRADECIMIENTOS

A nuestra tutora Jenny Venegas, y cotutora Diana Tinoco, por su retroalimentación y guía.

A Francisco, Adriana, Diana, Raúl y todos mis compañeros de trabajo

A mi novia María Krystel por el apoyo durante todo este proyecto.

Santiago Corral Santos

A nuestra tutora y cotutora por todo lo brindado en este semestre de titulación, a cada profesor que me brindó su conocimiento en esta estancia académica. A mis padres que siempre creyeron en mí. A mis amigos que saben de la felicidad de esta meta alcanzada.

“Si alcancé a ver más lejos, fue porque he subido a hombros de gigantes.” - Sir Isaac Newton. ¡Gracias totales!

Roddy A. Barcia Mero

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Santiago Enrique Corral Santos* y *Roddy Alberto Barcia Mero* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Santiago E. Corral
Santos



Roddy A. Barcia Mero

EVALUADORES

Nadia Flores

PROFESOR DE LA MATERIA

Jenny Venegas

PROFESOR TUTOR

PROFESOR COTUTOR

Diana Tinoco

RESUMEN

En el presente proyecto se realizó la caracterización de un compuesto de polietileno de baja densidad lineal con fibra de raquis de banano mediante pruebas químicas, mecánicas, térmicas y reológicas; con la finalidad de emplearlo como materia prima de menor costo a las resinas en el mercado.

Se realizó la determinación de humedad, lignina y celulosa de la fibra, y se realizaron ensayos de elongación y tensión a la ruptura, análisis termogravimétrico y determinación de índice de fluidez del compuesto con distintos porcentajes de fibra, para determinar una solución óptima. Además, se realizó un análisis de costos de la solución planteada. Se elaboró el compuesto empleando dos resinas con índice de fluidez de 2g/10min y 50 g/10min para comparar las tendencias de los resultados.

Se encontró que los mejores resultados se obtuvieron con la adición de anhídrido maleico como agente de acople y con la resina con índice de fluidez de 2 g/10 min.

Se concluye que la adición de un 2% de fibra de raquis de banano y 5% de anhídrido maleico a una matriz de polietileno de baja densidad lineal corresponde a la solución óptima en términos de propiedades mecánicas, mejorando los resultados de elongación y tensión, sin afectar significativamente la estabilidad térmica del compuesto.

Palabras Clave: Polietileno, banano, fibra, raquis.

ABSTRACT

In the current project, the characterization of a linear low density polyethylene composite with banana stalk fibers through chemical, mechanical, thermal and rheological tests; with the goal to use it as raw material at a lower cost than resins in the market.

The humidity, lignin and cellulose content of the fiber were determined, as well as tests for elongation and tension at break, thermogravimetric analysis and determination of melt flow index with different percentages of fiber, to find an optimal solution. Furthermore, a cost analysis of the solution was performed. The composite was fabricated using two resins with melt index of 2g/10min and 50g/10min to compare the trend of results.

The best results were obtained with the addition of maleic anhydride as a coupling agent and the resin with a melt index of 2g/10min.

It's concluded that the addition of 2% banana stalk fiber and 5% maleic anhydride to a linear low density polyethylene matrix corresponds to the optimal solution in terms of mechanical properties, improving elongation and tension, without significantly decreasing the thermal stability of the compound.

Keywords: Polyethylene, banana, fiber, stalk.

ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES.....	6
RESUMEN	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS.....	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
CAPÍTULO 1	1
1. Introducción	1
1.1 Descripción del problema	1
1.2 Justificación del problema	1
1.3 Objetivos	4
1.3.1 Objetivo General	4
1.3.2 Objetivos Específicos.....	4
1.4 Marco teórico.....	4
1.4.1 Plásticos	4
1.4.2 Fibras.....	6
1.4.3 Características químicas de la fibra	7
1.4.4 Normativa.....	8
CAPÍTULO 2	9
2. Metodología.....	9
2.1 Obtención de raquis y fibra	10

2.2	Caracterización química de fibra pretratada	12
2.2.1	Extraíbles	13
2.2.2	Lignina	13
2.2.3	Holocelulosa	13
2.2.4	α -Celulosa, β -celulosa y γ -celulosa	14
2.3	Formulación de compuesto	14
2.4	Fabricación del compuesto	16
2.5	Caracterización del compuesto	18
2.5.1	Pruebas mecánicas	18
2.5.2	Pruebas térmicas	21
2.5.3	Pruebas de índice de fluidez	22
2.6	Elección de la mejor solución	23
2.7	Análisis de costos	23
CAPÍTULO 3		24
3.	Resultados y Análisis	24
3.1	Caracterización de la fibra	24
3.2	Elaboración del compuesto	25
3.3	Pruebas mecánicas en compuesto	25
3.4	Pruebas de índice de fluidez en compuesto	29
3.5	Pruebas térmicas en compuesto	30
3.6	Análisis de resultados	34
3.6.1	Caracterización química	34
3.7	Análisis de costos	35
CAPÍTULO 4		38
4.	Conclusiones Y Recomendaciones	38

Conclusiones.....	38
Recomendaciones.....	39
BIBLIOGRAFÍA	41
APÉNDICES.....	44

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ASTM	American Society for Testing and Materials
TAPPI	Technical Association of the Pulp and Paper Industries
TGA	Análisis termogravimétrico
DSC	Escaneo Diferencial de Calorimetría
LEMAT	Laboratorio de Evaluación de Materiales

SIMBOLOGÍA

mil	Milésima de pulgada
g	Gramo
mg	Miligramo
pH	Potencial de Hidrógeno
m	Metro
mm	Milímetro
mL	Mililitro
°C	Grado centígrado

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Estructura molecular del polietileno	5
Figura 1.2 Termograma resultante del análisis termogravimétrico	6
Figura 1.3 Curva de deformación por tensión	6
Figura 2.1 Diagrama de flujo de la metodología práctica del proyecto	9
Figura 2.2. Estufa marca Binder	10
Figura 2.3 Raquis de banano	11
Figura 2.4 Proceso de corte del raquis para obtener la fibra.....	11
Figura 2.5 Fibra de raquis de banano luego de dos semanas sumergida en agua ...	12
Figura 2.6 Fibra de raquis de banano posterior al proceso de secado.....	12
Figura 2.7 Proceso de extracción con agua.....	13
Figura 2.8 Proceso de obtención de holocelulosa	14
Figura 2.9 Fibra molida empleando el Molino Planetario de Bolas.....	16
Figura 2.10 Mezcladora de doble tornillo marca Brabender	17
Figura 2.11 Pedazos recortados del compuesto luego de mezclado en Brabender ..	17
Figura 2.12 Prensa hidráulica empleada para la obtención de láminas	18
Figura 2.13 Troqueladora marca Zhongli empleada para la obtención de probetas..	19
Figura 2.14 Probetas obtenidas mediante la troqueladora	20
Figura 2.15 Equipo de ensayo universal marca Shimadzu	21
Figura 2.16 TGA	22
Figura 2.17 Plastómetro de extrusión marca Tinius Olsen.....	23
Figura 3.1 Láminas de compuesto con fibra de raquis de banano	25
Figura 3.2 Elongación a la ruptura con resina MI2.....	26
Figura 3.3 Elongación a la ruptura con resina MI50.....	27
Figura 3.4 Tensión a la ruptura con resina MI2.....	28
Figura 3.5 Tensión a la ruptura con MI50	28
Figura 3.6 Índice de fluidez con la resina MI2.....	29
Figura 3.7 Índice de fluidez con la resina MI50.....	30
Figura 3.8 Análisis termogravimétrico de la fibra	31
Figura 3.9 Análisis termogravimétrico del compuesto	32

Figura 3.10 Temperatura de cristalización 33

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Formulaciones del compuesto de polietileno de baja densidad lineal con fibra de raquis de banano (composición másica).....	15
Tabla 3.1 Resultados de caracterización química.....	24
Tabla 3.2 Temperaturas de degradación de materias primas empleadas.....	31
Tabla 3.3 Costos operativos del proceso.....	37
Tabla 3.4 Costo de equipos.....	37

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción del problema

A finales del 2020, la pandemia de COVID-19 causó un incremento en el consumo de productos plásticos, tales como envases desechables, y también produjo dificultades en las cadenas de suministros. Estos dos factores causaron un incremento en el costo de la resina, en algunos casos de hasta un 80%.

Una empresa que se dedica a la fabricación de fundas por extrusión de película soplada para el sector agrícola emplea polietileno de alta y baja densidad. Este cliente requiere reducir sus costos operativos para mantener un precio competitivo y no perder mercado ante la competencia, ya que la mayoría de sus ventas están dirigidas al sector bananero. El conflicto entre Rusia y Ucrania y la subsecuente reducción en el precio de la caja de banano han empujado a los productores bananeros a buscar el menor precio posible en las fundas para racimos.

Esta reducción de costos está limitada por dos factores: restricciones técnicas y normativas. Entre La solución no debe afectar significativamente las propiedades mecánicas de la funda, que son las que aseguran su funcionamiento en el campo como protección ante plagas e insectos. En relación con las normativas, la empresa está sujeta a la legislación ecuatoriana, particularmente al acuerdo ministerial número 19, la Política para la Gestión Integral de Plásticos, y la Ley Orgánica para la Racionalización, Reutilización y Reducción de Plásticos de Un solo Uso.

1.2 Justificación del problema

El constante incremento en el costo de las resinas conduce a la búsqueda de materias primas alternativas para mantener los costos sin reducir la calidad del producto. Una opción de creciente popularidad es el uso de material reciclado en la formulación. No obstante, la alta variabilidad en el origen del material puede causar dificultades de procesabilidad en la extrusión, como se expone a continuación.

Primero, el material reciclado puede causar una reducción en las propiedades mecánicas como impacto al dardo, elongación, rasgado, entre otros (Murat et al., 2020). Este posee un índice de fluidez mayor (Ladany & So, 1994), lo que provoca una disminución de rendimiento en la extrusión, afectando la eficiencia del proceso medida mediante la OEE (Overall Equipment Effectiveness) en la planta. Esto se refleja parcialmente como un incremento en la cantidad de material de desecho generado durante el proceso.

Segundo, debido a los posibles orígenes del material reciclado, muchas veces este requiere un proceso de lavado. Para contrarrestar la humedad generada se requiere adicionar desecante en la formulación, ya que la presencia de humedad causa inestabilidad en el globo durante la extrusión (Wang & Padua, 2003). No obstante, una cantidad excesiva de desecante fomenta la degradación de la película en condiciones de intemperie y causa ruptura de la funda durante su aplicación en el campo.

En la última década, se han desarrollado diversas investigaciones para determinar la factibilidad de usar fibras naturales en la producción de materiales plásticos, como una alternativa al uso de resinas sintéticas. De estos estudios han surgido opciones como fibra de yute (Ovalı & Sancak, 2020), cáscara de nuez (Mazur et al., 2020) y fibra de banano (Bhatnagar et al., 2015). Estas alternativas han demostrado ser eficientes al momento de ser utilizadas en mezclas de polímeros, ya que las propiedades del producto final no se ven afectadas de forma negativa.

Para empresas que fabrican principalmente fundas plásticas para el sector bananero, una fuente de recursos considerable y de fácil acceso es la planta de banano. Por este motivo, la propuesta del proyecto es utilizar la fibra del raquis de banano para agregar en el polietileno de baja densidad, con el fin de reducir la cantidad de resina virgen requerida en el proceso.

En las fincas, una vez que se cosechan los dedos de banano, los raquis son desechados, abandonados en el suelo o utilizados como alimento para ganado. Al

ser un desecho, su adquisición en grandes cantidades sería de bajo costo y se podría aprovechar de mejor manera en la elaboración de películas de polietileno. Por lo tanto, una industria de fabricación de productos plásticos, como son las fundas para racimos, tendría una amplia disponibilidad de raquis.

Este proyecto busca determinar la composición óptima del compuesto de polietileno de baja densidad reforzado con fibra de banano, para lograr un equilibrio entre las propiedades mecánicas, procesabilidad y costo. Una adición excesiva de fibra podría causar disminución en las propiedades mecánicas y degradación acelerada de las fundas durante su uso en el campo. En cambio, un porcentaje muy pequeño podría no representar suficiente ahorro como para justificar la inversión en procesar los raquis. Por este motivo, se realizará la caracterización tanto de la fibra como del compuesto con polietileno, para determinar la factibilidad de su uso en extrusión de película soplada.

Entre los diecisiete objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU, el número 12 promueve el consumo y producción responsables. Este proyecto se desarrollará en el marco de este objetivo, ya que al incorporar un material biodegradable en la materia prima se reduce la cantidad de plásticos de un solo uso empleados, sentando las bases para una producción más sostenible y economía verde.

Así mismo, se contemplará el artículo 4 del Acuerdo Ministerial número 19, que indica que: “se debe promover de manera efectiva la reducción en la fuente, que permita minimizar las cantidades de residuos plásticos a través de diferentes acciones como cambios en el diseño de los productos, mejoramiento de los procesos tecnológicos, o sustitución de materias primas” (Acuerdo Ministerial 19, 2014).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Demostrar la factibilidad técnica de la utilización de compuestos de polietileno de baja densidad reforzados con fibra de banano en procesos de extrusión de película soplada mediante caracterización por propiedades mecánicas, térmicas y químicas, para su uso como materia prima.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Analizar muestras de fibra de raquis de la planta de plátano ecuatoriano mediante análisis fisicoquímicos y mecánicos.
2. Caracterizar pellets del compuesto de fibra en matriz polimérica mediante análisis térmicos, reológicos y mecánicos.
3. Determinar el porcentaje óptimo de fibra de banano en el compuesto con polietileno, mediante pruebas mecánicas y térmicas.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Plásticos

El uso de plásticos en el mundo se ha incrementado desde 1960 debido a sus propiedades, como maleabilidad y ductilidad, y a su bajo costo de producción (Sadeghi et al., 2021). Sin embargo, los precios de la materia prima (resinas vírgenes) han sufrido incrementos por dificultades en la cadena de suministros debido a la pandemia de COVID-19 y a los incrementos en la demanda por el alto consumo de plásticos de un solo uso.

El polietileno de baja densidad (LDPE por sus siglas en inglés) es un polímero que posee cadenas muy ramificadas y presenta propiedades como: buena resistencia térmica, resistencia al impacto y flexibilidad (Jordan et al., 2016).

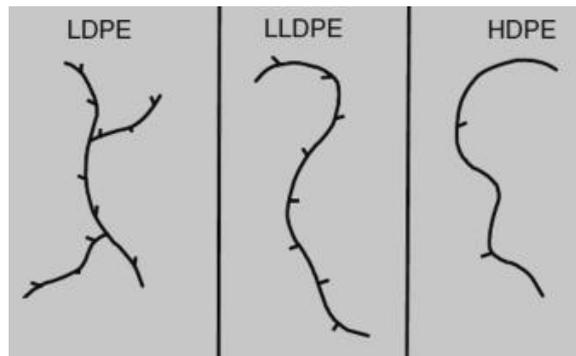


Figura 1.1 Estructura molecular del polietileno (Kupolati et al., 2017)

La extrusión de plásticos es un proceso industrial mecánico que sirve para moldear mezclas de polímeros. El material se funde y se inyecta en la extrusora, dentro de la cual un tornillo rotatorio se encarga de transportar el material hasta el final de la máquina para dar la forma preestablecida (Rosato et al., 2004).

La extrusión de película soplada, en particular, es un proceso en el que la resina derretida atraviesa un dado de forma circular, para luego inyectar aire y formar un tubo de película de polietileno conocida como globo. El globo asciende y disminuye su temperatura, para finalmente ser aplastada por rodillos (McKeen, 2017). La técnica de extrusión soplada es ampliamente usada en la fabricación de empaques para alimentos, estos pueden contener películas de capas simples hasta múltiples capas, dependiendo del tipo de empaque demandado.

Una de las pruebas mecánicas realizadas a películas de polietileno es la elongación, medida mediante la norma ASTM D638 en un Equipo de Ensayo Universal. Este equipo permite calcular la fuerza de tensión que puede ser aplicada al plástico antes de su ruptura, y el porcentaje de deformación experimentado por la muestra (Djafari Petroudy, 2017)

Aparte de las pruebas mecánicas, se pueden realizar pruebas térmicas en el polietileno, como el análisis termogravimétrico. Esta técnica permite conocer la estabilidad térmica de un material, midiendo la variación en su masa al ser expuesta a un incremento de temperatura (Ebnesajjad, 2011)

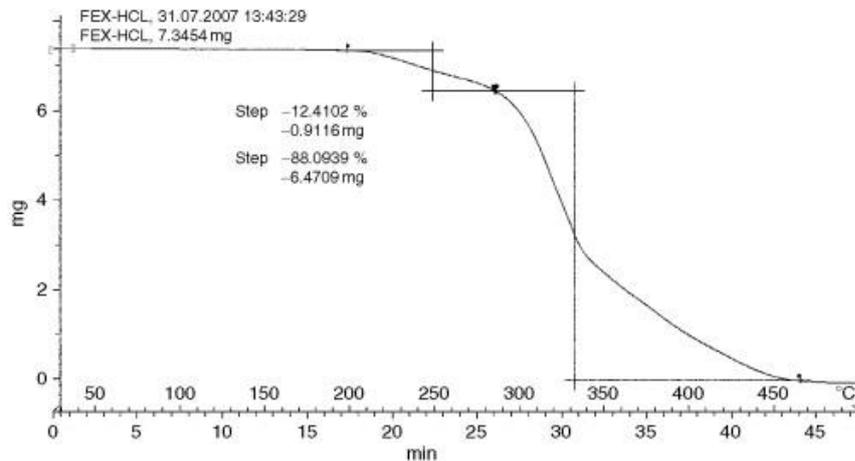


Figura 1.2 Termograma resultante del análisis termogravimétrico (Ebnesajjad, 2011)

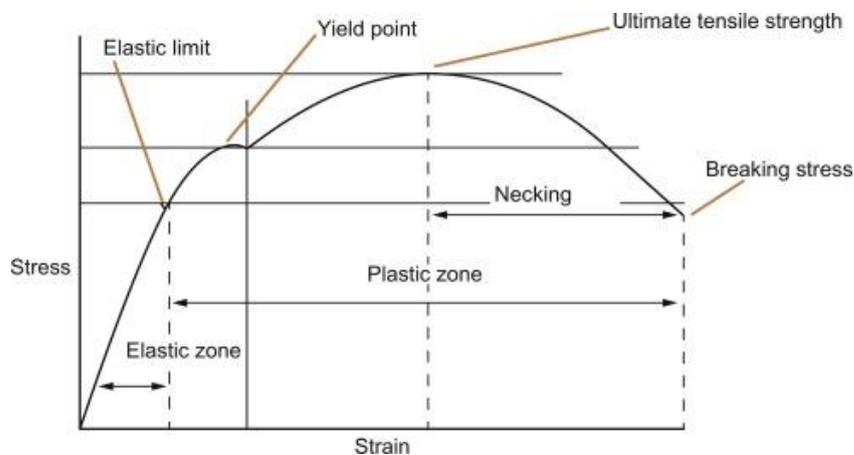


Figura 1.3 Curva de deformación por tensión (Singh & Verma, 2017)

1.4.2 Fibras

Las nuevas tendencias en la industria son la reducción del desperdicio producido y la optimización de los recursos. Una de las soluciones planteadas es el uso de fibras naturales para reforzar los productos plásticos. La comunidad científica se ha decantado por estudiar la viabilidad de distintos tipos de fibras naturales como madera, cáscara de nuez (Mazur et al., 2020), yute (Ovalı & Sancak, 2020) o banano (Bhatnagar et al., 2015).

En los últimos años la implementación de fibras de banano en compuestos termoplásticos ha ido en aumento (Ogunsile & Oladeji, 2016) debido a distintas propiedades como bajo peso, resistencia al fuego, buena absorción de la humedad o la biodegradabilidad del mismo (Bhatnagar et al., 2015). En estos ensayos se ha evidenciado que presenta buena resistencia mecánica a un costo menor, si se lo compara con materiales de refuerzo convencionales; adicionalmente en países productores y exportadores de banano la disponibilidad de la materia prima se puede considerar solventada.

Un compuesto polimérico es un material donde el polímero, en este caso el polietileno, conforma una matriz y se enlaza con el refuerzo para mejorar su desempeño en la aplicación deseada (Greene, 2021). El uso de distintas fibras naturales para la creación de compuestos poliméricos de polietileno permite desarrollar materias primas más económicas para uso industrial (Khanam & AlMaadeed, 2015)

1.4.3 Características químicas de la fibra

La estructura química de las fibras naturales se encuentra conformada, en mayor proporción, por holocelulosa y lignina, esto se explica por la composición de la pared celular en las células vegetales (Chávez-Sifontes & Domine, 2013). Adicionalmente, también se pueden encontrar compuestos como ácidos grasos e impurezas (extraíbles), humedad y materia no extraíble (Díaz Rodríguez, 2012). La holocelulosa puede ser detallada como α -celulosa, β -celulosa y γ -celulosa, esta técnica es utilizada para determinar la capacidad de degradación que presentan la madera y las distintas fibras naturales (Singh & Dhepe, 2022). Para determinar la composición de estas moléculas en fibras naturales, se debe utilizar una norma estandarizada, generalmente se toman protocolos de TAPPI (Technical Association of the Pulp and Paper Industry) y de ASTM (American Society for Test and Materials).

1.4.4 Normativa

En el marco de la legislación ecuatoriana, en el año 2014 se decretó el Acuerdo Ministerial 19, que corresponde a las Políticas para la Gestión Integral de Plásticos en el Ecuador y establece las pautas para direccionar la fabricación de plásticos hacia una producción sostenible. El acuerdo incluye recomendaciones sobre la sustitución de materias primas convencionales por biodegradables, análisis de ciclo de vida del plástico, y programas de reciclaje mediante centros de acopio. De esta manera se fomenta el aprovechamiento de los recursos y una transición hacia una economía verde (Acuerdo Ministerial 19, 2014).

Adicionalmente, el Texto Unificado de la Legislación Ambiental Secundaria (TULAS) establece la normativa para la gestión de desechos sólidos, peligrosos y no peligrosos. A nivel internacional, la gestión de desechos plásticos está restringida por el Convenio de Basilea, que rige sobre el transporte internacional de desechos, incluidos los plásticos, al cual el Ecuador está suscrito desde 1993.

La producción de banano en Ecuador satisface en un 30 % la demanda mundial (Centanaro & Nava, 2021), por lo tanto, es una industria con un impacto considerable en lo económico y en lo social en el país. En este sector se producen residuos, de los cuales no existe un aprovechamiento adecuado que permita una producción más sostenible y cercana a técnicas amigables con el medio ambiente. El raquis de banano posee fibra lignocelulósica, la cual ha ganado popularidad recientemente por su potencial para reemplazar las fibras sintéticas en la fabricación de productos biodegradables (Yang et al., 2019)

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

La metodología general utilizada durante el proyecto se muestra de forma resumida en la figura 2.1, donde se evidencian los pasos seguidos para obtener los resultados deseados.

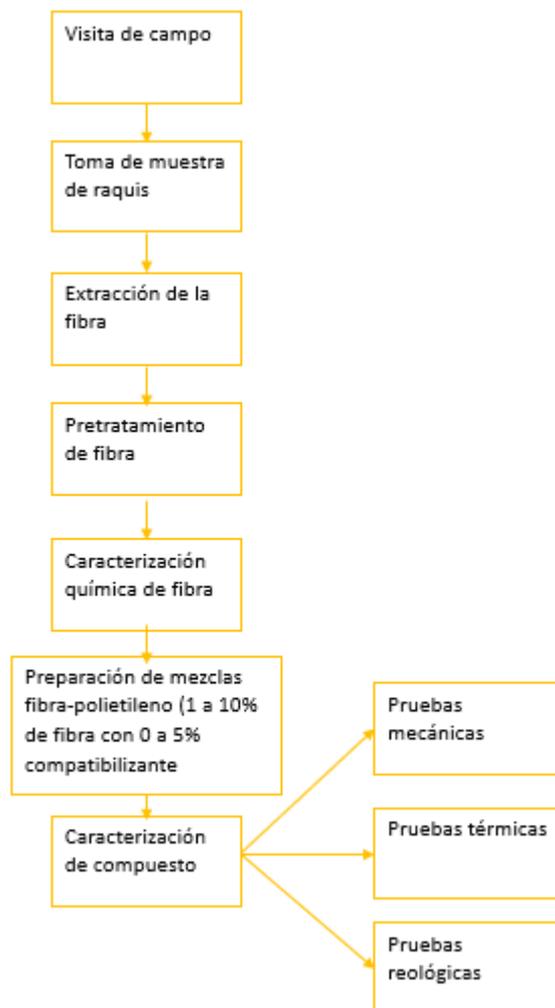


Figura 2.1 Diagrama de flujo de la metodología práctica del proyecto

2.1 Obtención de raquis y fibra

Para la extracción de las fibras, se obtuvieron raquis frescos de fincas bananeras. Empleando un cuchillo, se retiró la corteza y se procedieron a cortar pedazos de aproximadamente cinco milímetros de espesor. La fibra obtenida se sumergió bajo agua en un recipiente cerrado herméticamente durante una semana y media. Luego se retiró del agua y fue colocada en una estufa marca Binder, a 105 °C durante dos días para retirar completamente la humedad.

Los raquis fueron pesados completos, y se determinó el porcentaje de aprovechamiento de estos, considerando la masa de fibra seca obtenida dividido entre la masa total del raquis. De esta manera, se consideró la pérdida de fibra durante el proceso de cortado de los raquis y la humedad retirada.

Se determinó el porcentaje de humedad, mediante el método ASTM E871. Se calculó mediante la ecuación 2.1.

$$\%Humedad = \frac{M_i - M_f}{M_i} \times 100 \quad (2.1)$$

M_i: Masa inicial

M_f: Masa final



Figura 2.2. Estufa marca Binder



Figura 2.3 Raquis de banano



Figura 2.4 Proceso de corte del raquis para obtener la fibra



Figura 2.5 Fibra de raquis de banana luego de dos semanas sumergida en agua



Figura 2.6 Fibra de raquis de banana posterior al proceso de secado

2.2 Caracterización química de fibra pretratada

Se realizaron pruebas para la determinación del contenido de extraíbles, lignina, holocelulosa y celulosa en la fibra pretratada. Se realizaron pruebas duplicadas a excepción de los extraíbles.

2.2.1 Extraíbles

Para la determinación de extraíbles se realizaron extracciones siguiendo el procedimiento TAPPI 264. Se realizó una extracción soxhlet con acetona, donde se eliminaron ácidos grasos, y posteriormente se realizó una extracción con agua para eliminar la materia extraíble restante.

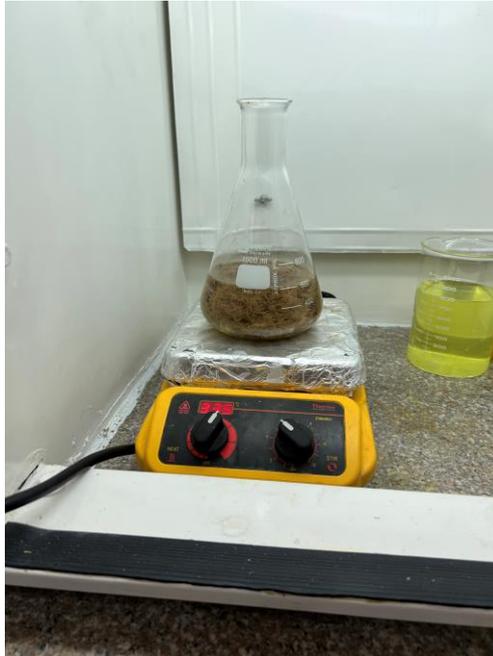


Figura 2.7 Proceso de extracción con agua

2.2.2 Lignina

Para determinar la lignina se siguió el procedimiento TAPPI 222. Se pesó 1 g de fibra sin extraíbles y se trató con ácido sulfúrico concentrado utilizando una plancha y un agitador magnético, como indica la norma establecida.

2.2.3 Holocelulosa

La determinación de la holocelulosa se realizó acorde a la norma ASTM D1104, se necesitó 2 g de fibra libre de extraíbles, que fueron tratadas con ácido acético glacial y clorito sódico durante 5 horas para su posterior filtrado, como se indica en el procedimiento estandarizado.



Figura 2.8 Proceso de obtención de holocelulosa

2.2.4 α -Celulosa, β -celulosa y γ -celulosa

El análisis de celulosa se realizó de acuerdo con la norma T 203 cm-99, donde se desglosa la celulosa en α -celulosa, β -celulosa y γ -celulosa. Para llevar a cabo dicho ensayo, se pretrató la fibra proveniente del ensayo de celulosa con hidróxido de sodio al 17.5% con agua destilada. Al finalizar el pretratamiento se utilizaron soluciones de dicromato de potasio 0.5 N, ácido sulfúrico 3 N, hidróxido de sodio al 17.5%, y sulfato amónico ferroso 0.1 N previamente estandarizado (agente titulante). Se utilizó la solución filtrada del pretratamiento y se tituló utilizando ferroína como indicador.

2.3 Formulación de compuesto

Una vez establecida la necesidad de reducción de costos en las materias primas, se analizó la adición de fibras de raquis de banano al polietileno de baja densidad. Esta solución, además de atacar problemas de costo de la resina virgen, está amparada bajo la normativa legal ecuatoriana en las Políticas para la Gestión Integral de Plásticos en el Ecuador.

Se trabajó con la adición de fibra de raquis de banano en distintos porcentajes, para determinar el impacto en las propiedades mecánicas, térmicas y reológicas. Se probó el uso de anhídrido maleico como agente de acople, para una comparación con los resultados obtenidos inicialmente, y además el uso de una resina con una fluidez muy superior a la inicial.

Se estableció como especificación técnica que los resultados de las pruebas térmicas, mecánicas y reológicas se vieran poco afectadas por la adición de la fibra, o incluso aumenten de forma favorable para la película.

Para la preparación del compuesto se probaron las siguientes formulaciones empleando la resina de polietileno de baja densidad lineal MI2:

Tabla 2.1 Formulaciones del compuesto de polietileno de baja densidad lineal con fibra de raquis de banano (composición másica)

Ensayo	Polietileno de baja densidad lineal (%)	Fibra de raquis de banano (%)	Anhídrido maleico (%)
1	100	0	0
2	99	1	0
3	98	2	0
4	95	5	0
5	90	10	0
6	95	0	5
7	94	1	5
8	93	2	5
9	90	5	5
10	85	10	5

Además, se realizaron ensayos sustituyendo la resina que posee un índice de fluidez de 2 g/10 min, con otra cuyo índice de fluidez es de 50 g/10 min, pero empleando los mismos porcentajes másicos.

Se trabajó con dos muestras patrón en blanco, es decir la resina pura y luego con la adición de anhídrido maleico. Estas serán el estándar de referencia para las pruebas mecánicas, térmicas y reológicas.

2.4 Elaboración del compuesto

La fibra seca se colocó en el Molino Planetario de Bolas marca Retsch, a 450 rpm, durante 5 minutos.



Figura 2.9 Fibra molida empleando el Molino Planetario de Bolas

La fibra de raquis molida se mezcló en las proporciones indicadas en la Tabla 1. En todos los ensayos se utilizaron 35 g de mezcla, lo requerido por el equipo. Para la preparación del compuesto, se empleó la mezcladora de doble tornillo marca Brabender, modelo 2008. Los ensayos fueron realizados a 170 °C, durante 15 minutos.



Figura 2.10 Mezcladora de doble tornillo marca Brabender

La mezcla se introduce en la parte superior del equipo y luego se coloca el pistón con peso. Una vez transcurrido el tiempo del ensayo, se abre el equipo para extraer el compuesto resultante. Este compuesto es luego cortado en pedazos de aproximadamente 2 x 2 mm.



Figura 2.11 Pedazos recortados del compuesto luego de mezclado en Brabender

2.5 Caracterización del compuesto

2.5.1 Pruebas mecánicas

Para realizar los ensayos mecánicos se requirió fabricar láminas de 145 x 145 x 0.5 mm, para lo cual se colocó el compuesto obtenido del brabender en un molde metálico. Este molde fue colocado en la prensa, configurada para una temperatura de 170 °C. Primero se elevó la prensa hasta que ambas placas entraron en contacto y derritieron la muestra para que ocupara el espacio del molde. Luego, se elevó la prensa hasta alcanzar una presión de 1500 psi, se liberó inmediatamente y se la volvió a subir. Este proceso se repitió cinco veces, para evitar la presencia de burbujas de aire en la lámina resultante. Una vez realizado esto, se mantuvo la presión en 1500 psi durante cinco minutos, y luego en 2000 psi durante el mismo tiempo. Al finalizar este procedimiento, se dejó enfriar la muestra y se la extrajo del molde. Todo este proceso de prensado se repitió para cada formulación planteada.



Figura 2.12 Prensa hidráulica empleada para la obtención de láminas

Luego, estas muestras fueron cortadas para obtener probetas de 25 mm x 115 mm. Para esto, se utilizó una troqueladora marca Zhongli. Estas dimensiones corresponden a la norma ASTM D638 para materiales rígidos con un espesor

hasta de 14 mm. No obstante, debido a que el equipo de ensayo universal disponible tiene una limitante de 100 N de fuerza para los ensayos, no se pudo emplear la probeta estipulada en la norma ASTM D882, para películas plásticas de espesor menor a 1 mm, y que son de 25.4 mm x 100 mm.



Figura 2.13 Troqueladora marca Zhongli empleada para la obtención de probetas

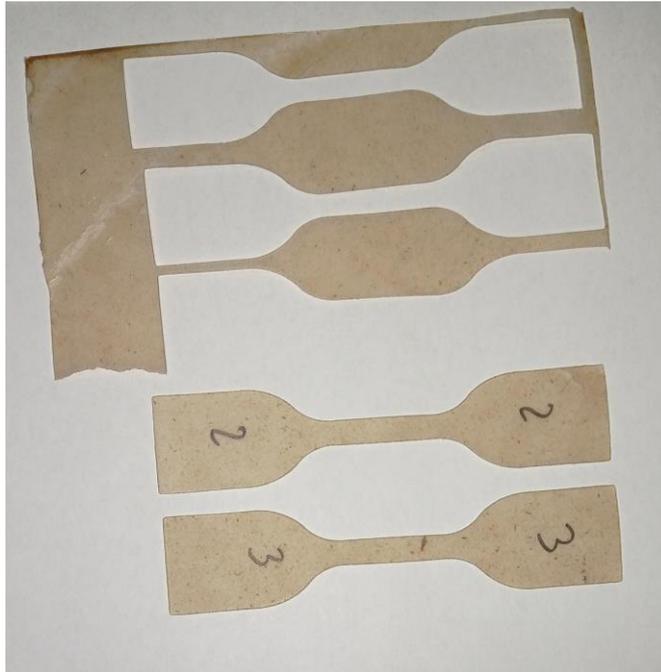


Figura 2.14 Probetas obtenidas mediante la troqueladora

Una vez cortadas las probetas, se empleó un equipo de ensayo universal marca Shimadzu para la determinación del porcentaje de elongación, fuerza (N) y tensión (N/mm^2) en la ruptura. La muestra es colocada entre dos mordazas y ajustada para luego proceder con el ensayo. El equipo estira la muestra hasta su ruptura, determinando el porcentaje de elongación, tensión y fuerza requerida. Se realizaron cinco ensayos por cada muestra, según lo requerido por la norma ASTM D882.



Figura 2.15 Equipo de ensayo universal marca Shimadzu

Se encontró una alta variabilidad en los espesores de la película obtenida en la prensa, el molde poseía un espesor de 0.5 mm pero al medir las muestras con un calibrador manual, se encontró resultados entre 0.55 mm y 0.75 mm. Por este motivo, se realizaron 5 mediciones en cada probeta y se tomó el espesor promedio. Este valor se ingresó al equipo de ensayo universal, para que este pueda calcular la tensión a la ruptura (N/mm^2) de forma más precisa. El valor de elongación a la ruptura no se ve afectado por el espesor, pero la tensión sí ya que consiste en la fuerza necesaria para la ruptura dividida para el área de la muestra.

2.5.2 Pruebas térmicas

Para la determinación de la estabilidad térmica se analizaron las muestras a través del equipo termogravimétrico (TGA) ubicado en el Laboratorio de Materiales LEMAT-ESPOL. Se analizaron individualmente la fibra, la resina y todas las formulaciones del compuesto con la resina MI2, para determinar el impacto de la proporción de la fibra en la degradación de acuerdo con la norma ASTM E2550. Debido a la complejidad y costo del equipo, no fue permitido el uso directo del mismo, por lo que las distintas muestras preparadas fueron entregadas en el LEMAT para su análisis y posteriormente fueron enviados los resultados

Los resultados obtenidos consisten en la temperatura, porcentaje de masa y derivada del porcentaje de masa (%/°C). Empleando estos datos, se determinó el punto de inflexión de la curva, que corresponde a la temperatura de degradación.



Figura 2.16 TGA

Además, con los datos del DSC se obtuvo la temperatura de cristalización, que corresponde al pico exotérmico en la gráfica de flujo de calor (W/g) vs temperatura (°C).

2.5.3 Pruebas de índice de fluidez

Se empleó un plastómetro de extrusión marca Tinius Olsen, modelo MP1200, para la determinación del índice de fluidez tanto de la resina como de las distintas formulaciones del compuesto preparado. Para esto, se colocó aproximadamente 4 g del compuesto en el tonel del equipo. Dado que se trata de polietileno de baja densidad lineal, los ensayos fueron realizados a 190 °C y empleando una pesa de 2.06 kg, acorde a la norma ASTM D1238. El material es empujado a través de un cabezal, con un diámetro de 2.095 mm.

En intervalos constantes de tiempo indicados por el equipo, se corta el flujo de compuesto derretido con una espátula y se almacena cada muestra. Finalmente, se obtienen cuatro cortes que deben ser pesados, y la masa resultante se ingresa al equipo para el cálculo del índice de fluidez, cuyas unidades son g/10 min.



Figura 2.17 Plastómetro de extrusión marca Tinius Olsen

2.6 Elección de la mejor solución

Se compararon los resultados obtenidos de las distintas formulaciones del compuesto, con el polietileno de baja densidad lineal solo. Así, se determinó el impacto de la adición de fibra en las propiedades mecánicas, térmicas e índice de fluidez. Finalmente, se eligió la formulación que presente mejores propiedades mecánicas sin impactar de forma significativa la estabilidad térmica ni fluidez.

2.7 Análisis de costos

Se determinó la cantidad de fibra de raquis de banano seca para reemplazar el polietileno según la formulación seleccionada en el punto 2.6. Luego, se analizaron los costos de transporte de los raquis, consumo energético de los equipos requeridos para el procesamiento de la fibra y mano de obra requerida. Además, se cuantificó la inversión requerida para todos los equipos.

Se comparó el costo de emplear la misma cantidad de resina, y se determinó el ahorro anual representado por el uso de la fibra. Con este dato, se aproximó el tiempo de retorno de la inversión realizada por los equipos para determinar la viabilidad del proyecto.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Caracterización de la fibra

Los resultados de la caracterización química se recopilaron en la tabla 3.1.

Se calculó el porcentaje de humedad natural de muestras frescas de raquis de banano sin pretratamiento, obteniendo un promedio en base húmeda. El porcentaje de materia extraíble de la fibra se obtuvo en base seca.

Los resultados de lignina y de holocelulosa, fueron calculados con respecto a la cantidad de fibra sin extraíbles y corresponden a valores de media aritmética de dos ensayos realizados. Los resultados de desglose de la composición de la holocelulosa se obtuvieron en base a la cantidad de holocelulosa presente en fibra sin extraíbles.

Tabla 3.1 Resultados de caracterización química

Caracterización Química		
Parámetros	Unidades	Resultados
Humedad Natural	% en base húmeda	92.73
Extraíbles	% en base seca	8.93
Lignina	% sin extraíbles	13.67
Holocelulosa	% sin extraíbles	83.78
α -celulosa	% en holocelulosa	68.49
β -celulosa	% en holocelulosa	10.65
γ -celulosa	% en holocelulosa	20.86

3.2 Elaboración del compuesto

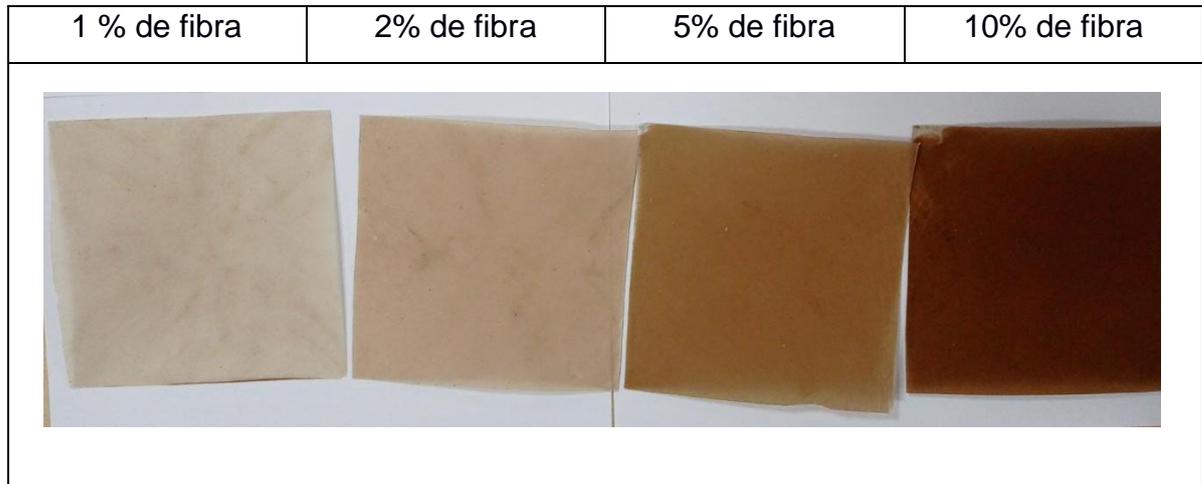


Figura 3.1 Láminas de compuesto con fibra de raquis de banano

Se obtuvieron láminas del compuesto con todas las formulaciones planteadas. Se observó un impacto notable en las propiedades ópticas de la película con el incremento en la cantidad de fibra de raquis de banano, como se evidencia en la figura 3.1.

3.3 Pruebas mecánicas en compuesto

Mediante el equipo de ensayo universal, se determinó la elongación en la ruptura de las distintas formulaciones del compuesto. Se compararon los resultados obtenidos con el compuesto de fibra y resina, contra aquellos obtenidos al añadir un 5% de anhídrido maleico. La figura 3.2 muestra los resultados obtenidos empleando el polietileno de baja densidad lineal MI2.

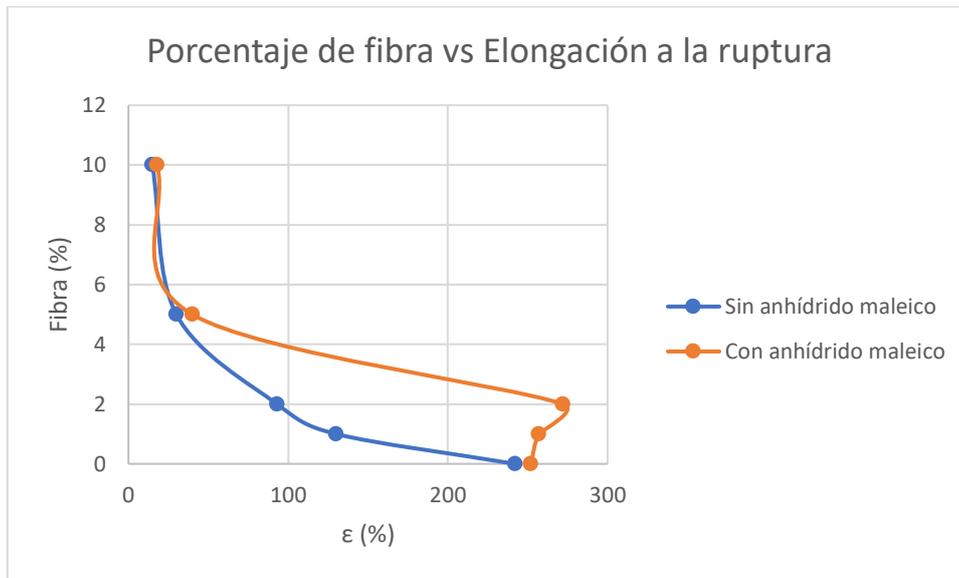


Figura 3.2 Elongación a la ruptura con resina MI2

En el compuesto sin adición de anhídrido maleico, se observó una disminución abrupta en el porcentaje de elongación a la ruptura. No obstante, con el uso de compatibilizador se observa que la elongación aumenta, para el compuesto con 1 y 2% de fibra de raquis de banano, respectivamente. No obstante, al alcanzar el 5% de fibra se observa el mismo descenso que en el caso anterior.

En la figura 3.3 se observan los resultados de elongación a la ruptura empleando la resina MI50, con índice de fluidez de 50g/10 min.

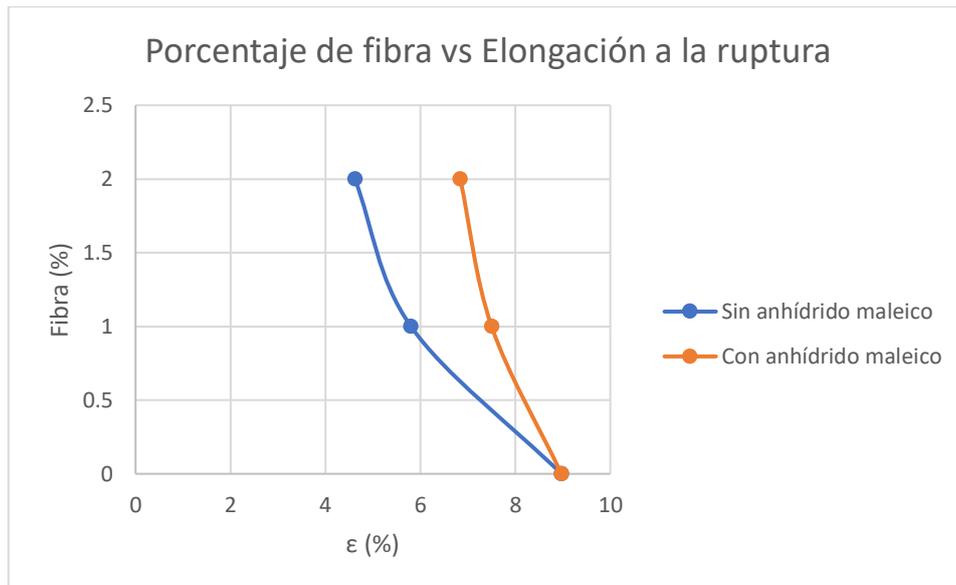


Figura 3.3 Elongación a la ruptura con resina MI50

En este caso, no se evidenció un incremento en la elongación a la ruptura con la adición de anhídrido maleico, como sucedió con la resina MI2. No obstante, si se evidencia que el agente de acople redujo la disminución de dicha propiedad con el incremento en la cantidad de fibra.

En el equipo de ensayo universal también se determinó la tensión a la ruptura del compuesto. La figura 3.4 muestra los resultados obtenidos empleando el polietileno de baja densidad lineal MI2.

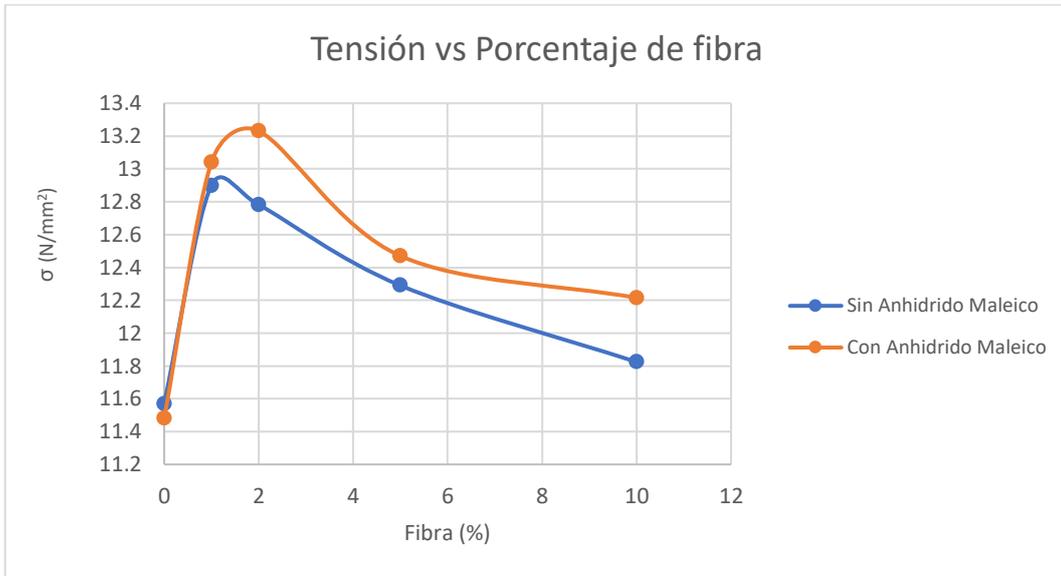


Figura 3.4 Tensión a la ruptura con resina MI2

Se observó la misma tendencia que en los resultados obtenidos en elongación, las propiedades mecánicas óptimas se obtuvieron empleando un 2% de fibra de raquis de banano con adición de 5% de anhídrido maleico como agente de acople. En la figura 3.5 se observan los resultados de tensión a la ruptura empleando la resina MI50.

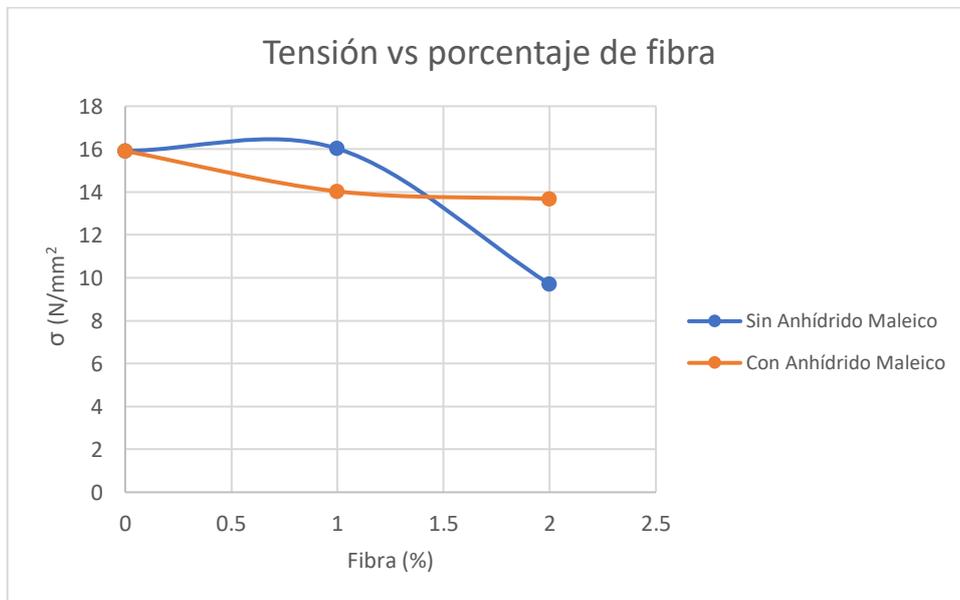


Figura 3.5 Tensión a la ruptura con MI50

El impacto de la fibra en las propiedades mecánicas del compuesto depende de la naturaleza de esta. Generalmente, la adición de fibras naturales en un termoplástico causa una disminución de la elongación a la ruptura (Djafari Petroudy, 2017). No obstante, este factor depende de la naturaleza de la fibra, y en ciertos casos su adición aumenta la elongación (Bazan et al., 2020).

3.4 Pruebas de índice de fluidez en compuesto

Se realizó la determinación del índice de fluidez en el plastómetro de extrusión. En la figura 3.6 se observan los resultados obtenidos empleando la resina MI2. Con la adición de la fibra de raquis de banano, se evidenció una disminución del índice de fluidez. Adicionalmente, el compuesto elaborado con 5% de anhídrido maleico tuvo menor fluidez.

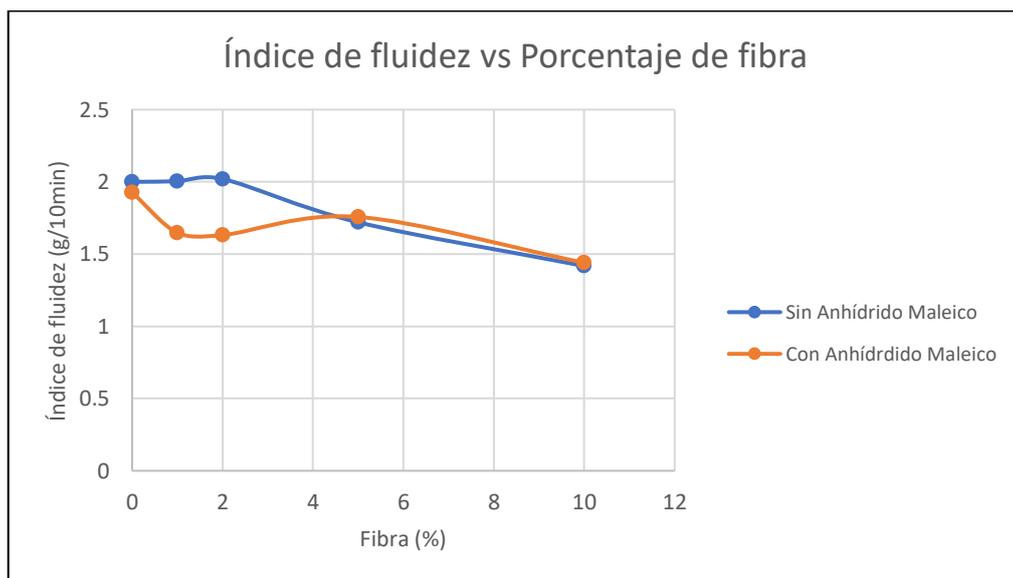


Figura 3.6 Índice de fluidez con la resina MI2

Al aumentar el porcentaje de fibra de raquis de banano, a partir de un 5% de fibra se encontró rugosidad en las muestras obtenidas. Esto causó la formación de burbujas de aire, causando alta variabilidad en los resultados obtenidos.

En la figura 3.7 se observan los resultados obtenidos empleando la resina MI50.

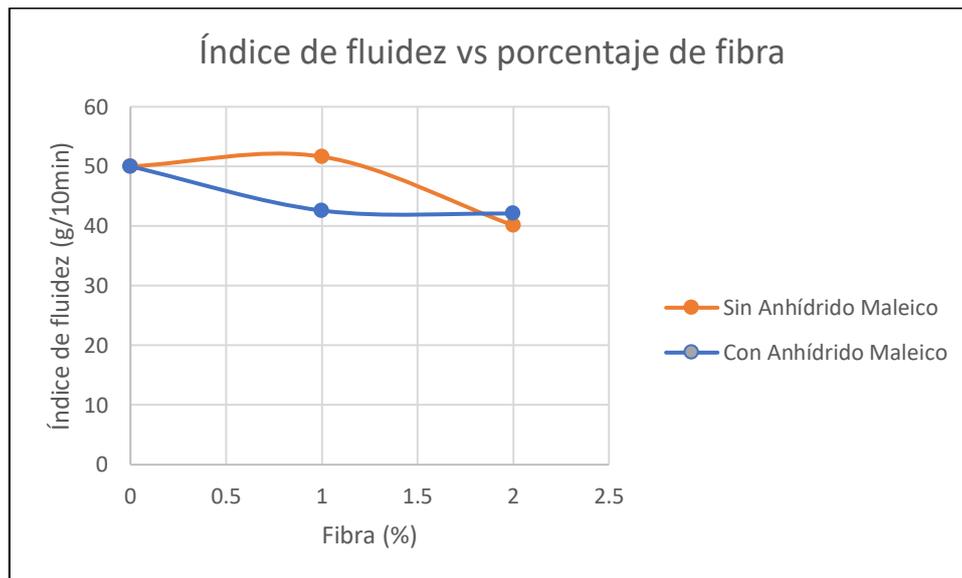


Figura 3.7 Índice de fluidez con la resina MI50

3.5 Pruebas térmicas en compuesto

Se analizaron los datos obtenidos del TGA, y se determinó la temperatura de degradación de las muestras. La fibra de raquis de banano experimentó la principal descomposición entre 300 °C a 360 °C. En la figura 3.8 se observa la gráfica del DSC-TGA obtenida para la fibra.

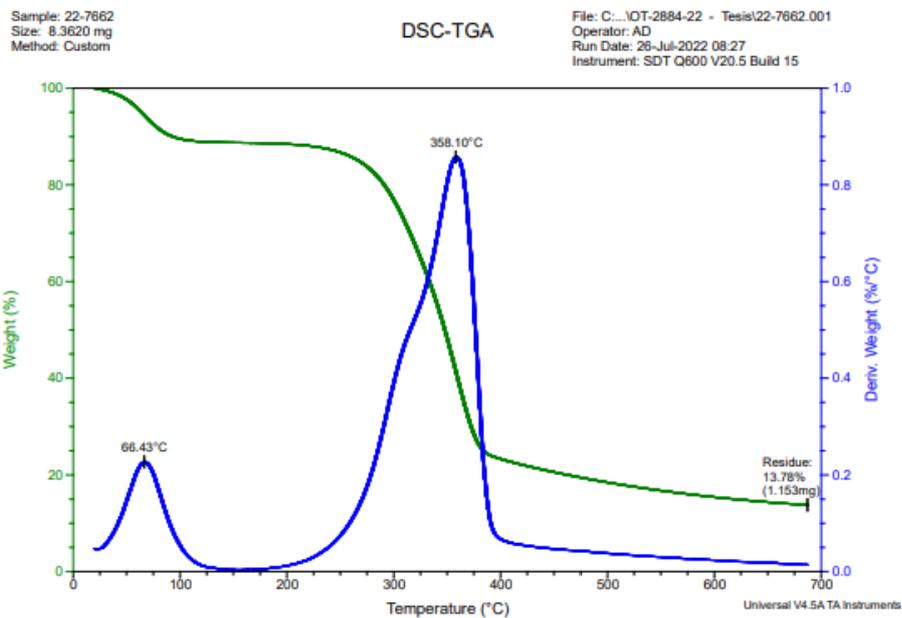


Figura 3.8 Análisis termogravimétrico de la fibra

Tabla 3.2 Temperaturas de degradación de materias primas empleadas

Material	Temperatura de degradación (°C)
Polietileno de baja densidad lineal MI2	491.67
Anhídrido maleico	483.69
Fibra de raquis de banano	358.1

Luego, se realizó el análisis termogravimétrico al compuesto con las distintas formulaciones realizadas.

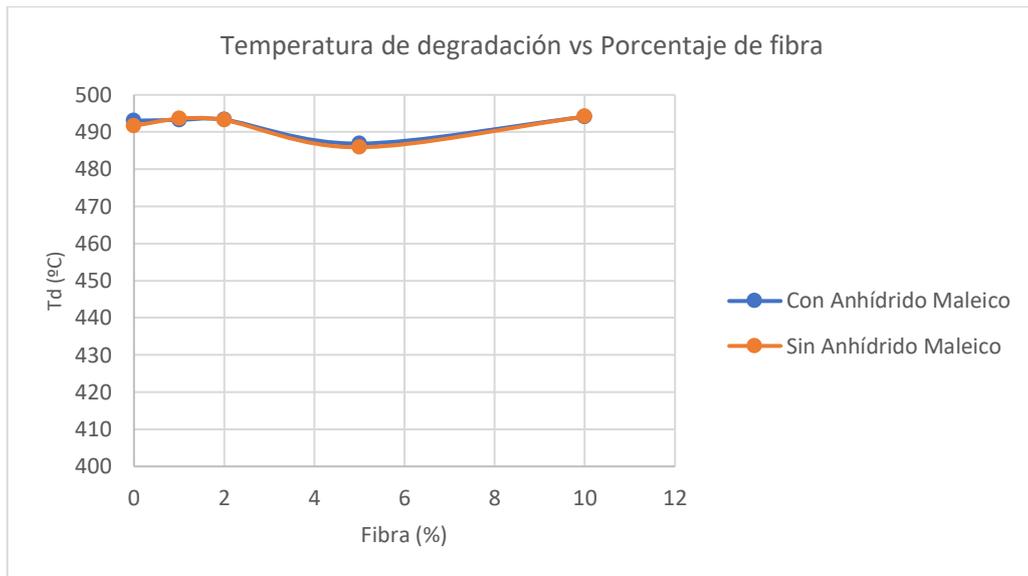


Figura 3.9 Análisis termogravimétrico del compuesto

No se observó una diferencia concluyente entre los resultados obtenidos para la temperatura de degradación. Realizando un análisis ANOVA entre los datos obtenidos con anhídrido maleico y sin anhídrido maleico, obteniendo un valor p de 0.84 se concluye que no hay una diferencia significativa entre las medias, por lo que la adición del agente de acople no afectó los resultados de degradación.

Finalmente, con los datos de flujo de calor obtenidos del DSC se obtuvo la temperatura de cristalización del compuesto. Los resultados se observan en la figura 3.9.

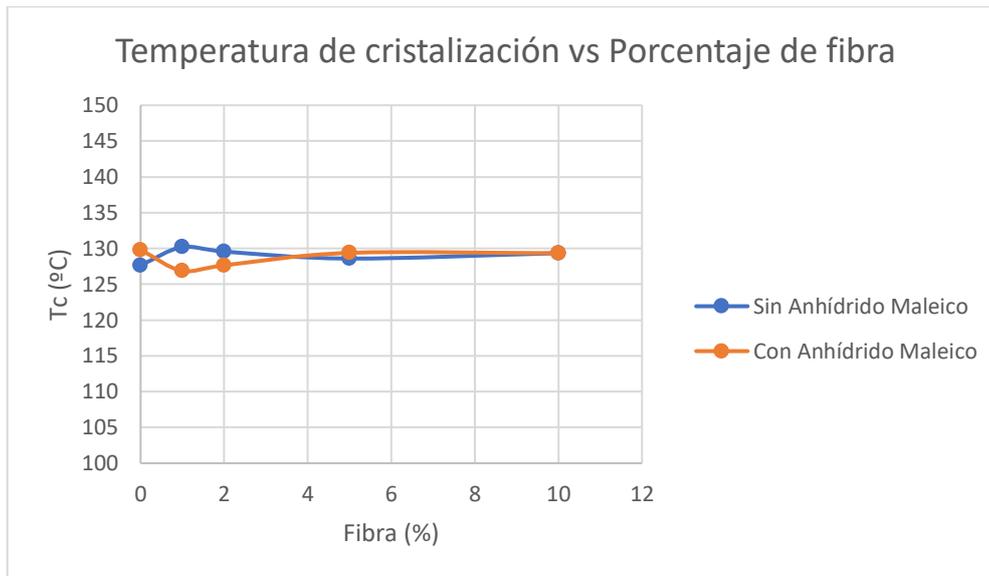


Figura 3.10 Temperatura de cristalización

Al igual que con la temperatura de degradación, no se observa una tendencia concluyente. De igual manera, al realizar un análisis ANOVA se obtiene un valor p de 0.53, por lo que no se rechaza la hipótesis nula, no hay una diferencia estadísticamente significativa entre las medias.

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
Column 1	5	2458.53	491.706	11.38143
Column 2	5	2460.63	492.126	8.69658

ANOVA

<i>Source of Variance</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.441	1	0.441	0.043929	0.839225	5.317655
Within Groups	80.31204	8	10.03901			
Total	80.75304	9				

Figura 3.11 Análisis ANOVA

3.6 Análisis de resultados

3.6.1 Caracterización química

Se pueden comparar los resultados con especies provenientes de otras regiones, por ejemplo: con fibra natural de India se obtuvo un porcentaje de holocelulosa de 67.1%, de α -celulosa un 62.1% y de lignina un 17% (Vardhini et al., 2016), observando se infiere que únicamente los porcentajes de lignina y de α -celulosa se encuentran cercanos al valor obtenido experimentalmente con la fibra empleada, mientras que para holocelulosa es un valor que difiere en gran magnitud.

También se puede citar otro caso de estudio con fibra de otra región de India, donde se obtuvo un resultado de holocelulosa de un 83.69 % y en el caso de la lignina un 7.67 % (Kenned et al., 2022), aquí se puede notar que el valor de holocelulosa se asemeja más al expuesto en la tabla 3.2.

De acuerdo con la literatura revisada, las propiedades de la fibra natural dependen de diversos factores como: condiciones ambientales, los tipos de especies o el método de determinación, por tanto, no es muy común encontrar proporciones con valores cercanos, por lo que los resultados tienden a variar en gran magnitud (Silva et al., 2020).

3.6.2 Pruebas mecánicas

Se determinó que los mejores resultados fueron obtenidos con la resina MI2, un 2% de fibra de raquis de banano y 5% de anhídrido maleico. Esto se debe a que el anhídrido maleico cumple la función de mejorar la compatibilidad entre la fibra polar e hidrofílica, y el polietileno no polar e hidrofóbico (Hamim et al., 2018).

Al comparar los resultados de MI50 con MI2, se observó que los resultados son considerablemente menores, esto debido a que generalmente un mayor índice de fluidez generalmente implica una disminución en las propiedades mecánicas (Carvalho et al., 2020).

3.6.3 Análisis termogravimétrico

En el análisis de la fibra, se observan dos picos: el primero corresponde a la despolimerización de la hemicelulosa, y el segundo a la descomposición de la celulosa (Zhang et al., 2020).

En los análisis realizados al compuesto, la fibra no tiene un impacto significativo en la estabilidad térmica del compuesto, por lo que, considerando su impacto positivo en las propiedades mecánicas, es una opción viable.

3.6.4 Índice de fluidez

Tanto en el análisis realizado con resina MI2 y MI50, se observó una menor fluidez con la adición del agente de acople, lo cual generalmente es preferido para procesos que emplean extrusión, mientras que una mayor fluidez es preferida en la inyección (Spear et al., 2015). No obstante, la diferencia fue pequeña y en general la adición de fibra de raquis de banano no afectó significativamente la fluidez del compuesto, aunque sí causó mayor porosidad en las muestras obtenidas a partir de un 5% de fibra.

3.7 Análisis de costos

El análisis se realizará tomando de referencia la fórmula con 2% de fibra de raquis de banano y 5% de anhídrido maleico.

El volumen de producción promedio de fundas de campo en la planta es de 6 toneladas diarias. La adición de fibra de banano se puede realizar en fundas en campo, ya que generalmente llevan pigmento, lo cual disminuye el impacto de la coloración.

El 2% de esta producción, que corresponde a fibra seca de raquis de banano, es de 120 kg diarios de fibra seca de raquis de banano. Considerando que en promedio el raquis tiene 92% de humedad, esto significa que para obtener esta cantidad de fibra seca se requieren 1500 kg de raquis por día.

Se toma como referencia el costo de transporte de las fundas que posee la compañía, \$0.07/kg. Esto equivale a \$105 diarios por costos de transporte para suplir la demanda de raquis.

Se encontró un precio de \$1500/ton para el anhídrido maleico, lo cual para el 5% que se emplearía, corresponde a \$9 diarios en esta materia prima.

A continuación, se describen los costos asociados con los equipos empleados.

Primero, el costo de extracción de la fibra. Una prensa mecánica con capacidad para 2400 kg/día (por encima de lo requerido) tiene un costo aproximado de \$6000. Su consumo energético es de 7.5 kW, considerando el costo en Ecuador de \$0.092/kWh, equivale a un consumo de \$16.70/día.

Luego se consideró el costo del secado. Un secador con capacidad para 480 kg por cada lote tiene un costo aproximado de \$8500, por lo que, para suplir la demanda total de fibra, se requieren 4. Este secador tiene un consumo energético de 1.8 kW, para un total de 7.2 kW para los 4. Considerando el costo en Ecuador de \$0.092/kWh, equivale a un consumo de \$16/día.

Como último equipo, el costo de la molienda. Se consideró un molino de \$8000, cuyo consumo energético de 2.2 kW equivale a un costo de \$4.90/día.

Finalmente, se consideró necesario 2 personas para la operación de los equipos, considerando el salario básico esto equivale a \$28.33/día. La tabla 3.3 resume los costos operativos del proceso.

Tabla 3.3 Costos operativos del proceso

Operaciones	Costo (\$/día)
Transporte	105
Energía para prensa	16.69
Energía para secado	16.02
Energía para molienda	4.89
Personal	28.33
Anhídrido maleico	7.8
Total	178.73

Tabla 3.4 Costo de equipos

Equipos	Precio (\$)
Secadores	34,000
Prensa	6,000
Molino	8,000
Total	48,000

Para cuantificar el ahorro, se consideró el costo de la resina reemplazada por el uso de 2% de fibra. Las fundas de campo están compuestas principalmente por polietileno de alta densidad, cuyo costo es de \$1.80/kg. Por lo tanto, los 120 kg/día empleados tendrían un costo total de \$216 kg/día.

La diferencia entre esto y el costo diario de la fibra es de \$36/día de ahorro, o \$13,000 anuales, lo que significa que la inversión total de los equipos se pagaría en aproximadamente 4 años.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Se realizaron las pruebas químicas y se determinó el contenido de lignina, holocelulosa, α -celulosa, β -celulosa, γ -celulosa y humedad de la fibra de raquis de banano como parte de su caracterización.

Se realizaron las pruebas de tensión y elongación del compuesto, y se encontró que estas propiedades mecánicas mejoraron con un 2% de fibra de raquis de banano y presencia de 5% de anhídrido maleico.

Para analizar la aplicabilidad del compuesto y además facilitar la miscibilidad, se probaron dos tipos de resinas: con fluidez de 2 y 50 g/10 min respectivamente. Mediante las pruebas mecánicas, se determinó que la de MI 2 es superior ya que los resultados de tensión y elongación fueron muy superiores. No obstante, en otras aplicaciones como inyección, la segunda opción podría ser más conveniente.

Mediante los ensayos en DSC/TGA, se encontró que la adición de fibra no afectó la estabilidad térmica del compuesto, ya que se determinó mediante un análisis ANOVA que la temperatura de degradación no varió significativamente con las distintas formulaciones, obteniendo diferencias menores a 5 °C entre los resultados. Esto es debido a que la temperatura de degradación de la fibra sola es elevada.

Mediante las pruebas en el plastómetro, se determinó el índice de fluidez del compuesto y se encontró que este disminuyó ligeramente con la adición de fibra.

De acuerdo con los resultados de todos los ensayos realizados descritos previamente, se determinó que la formulación óptima del compuesto es empleando un 93% de polietileno de baja densidad lineal, con 2 % de fibra de raquis de banano y 5 % de anhídrido maleico, ya que presentó un incremento en las propiedades mecánicas con respecto al polietileno sólo, mientras que no impactó negativamente la temperatura de degradación del compuesto ni el índice de fluidez.

De acuerdo con el análisis de costos realizado, la adición de 2% de fibra representa un ahorro de \$13,000 anuales, recuperando la inversión de \$48,000 en equipos necesaria para la operación en 3.5 años. Por lo tanto, la solución planteada es viable económicamente.

Recomendaciones

Se recomienda realizar el análisis con porcentajes de fibra de banano entre 2% y 5%, para determinar si existe un punto intermedio con propiedades mecánicas aún superiores.

Se debe elaborar las probetas para las pruebas mecánicas empleando otra metodología, para evitar la alta variabilidad en el espesor encontrada. Por ejemplo, empleando moldes que permitan un desvío del material en exceso, para evitar el incremento en el espesor.

A futuro, se podría realizar un estudio con diferentes tamaños de partícula para determinar si se pueden mejorar las propiedades mecánicas con un mayor tiempo de molienda, más revoluciones por minuto o usando otro equipo. Se debería reducir el tamaño de partícula para mejorar la dispersión, aumentando la cantidad de fibra que se puede adicionar al compuesto sin afectar las propiedades mecánicas.

También se debería analizar el impacto de la variación en la cantidad de anhídrido maleico empleada, buscando un balance entre el incremento de costo y las propiedades mecánicas.

Se sugiere aplicar un análisis de ciclo de vida (ACV) para poder identificar los impactos potenciales con el medio ambiente, de esta forma se puede garantizar una producción más sostenible a corto y largo plazo.

Se debe repetir los ensayos mecánicos, empleando un equipo con un mayor rango de fuerza, para emplear las probetas correctas según la norma ASTM.

Finalmente, se puede analizar el impacto de la adición de la fibra de raquis de banano en otra matriz polimérica como por ejemplo polipropileno. También se debe analizar su uso en otras aplicaciones, como inyección.

BIBLIOGRAFÍA

- Bazan, P., Mierzwinski, D., Bogucki, R., & Kuciel, S. (2020). *Bio-Based Polyethylene Composites with Natural Fiber: Mechanical, Thermal, and Ageing Properties*.
- Bhatnagar, R., Gupta, G., & Yadav, S. (2015). A Review on Composition and Properties of Bagasse Fibers. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 6(5), 49–52. <http://www.ijser.org>
- Carvalho, M. S. de, Azevedo, J. B., & Barbosa, J. D. V. (2020). Effect of the melt flow index of an HDPE matrix on the properties of composites with wood particles. *Polymer Testing*, 90, 106678. <https://doi.org/10.1016/j.polymeresting.2020.106678>
- Centanaro, P. H., & Nava, J. C. (2021). Nudos críticos de procesos gerenciales en unidades productivas de banano, Milagro, Ecuador. *Revista CEA*, 7(13). <https://doi.org/10.22430/24223182.1554>
- Chávez-Sifontes, M., & Domine, M. E. (2013). Lignina, estructura y aplicaciones: métodos de despolimerización para la obtención de derivados aromáticos de interés industrial. *Avances En Ciencias e Ingeniería*, 4(4), 15–46.
- Díaz Rodríguez, A. Á. ; C. P. G. M. B. F. (2012). *Caracterización Química De Biomasa Y Su Relación Con El Poder Calorífico*. 1–12.
- Djafari Petroudy, S. R. (2017). Physical and mechanical properties of natural fibers. In *Advanced High Strength Natural Fibre Composites in Construction*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100411-1.00003-0>
- Ebnesajjad, S. (2011). Surface and material characterization techniques. In *Handbook of Adhesives and Surface Preparation*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-4461-3.10004-5>
- Greene, J. (2021). Polymer Composites. In *Automotive Plastics and Composites* (pp. 191–222). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/C2018-0-03030-3>
- Hamim, F. A. R., Ghani, S. A., Zainuddin, F., & Ismail, H. (2018). Taro Powder (*Colocasia esculenta*) Filler Reinforced Recycled High Density Polyethylene/Ethylene Vinyl Acetate Composites. In *Natural Fibre Reinforced Vinyl Ester and Vinyl Polymer Composites*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102160-6.00012-3>
- Jordan, J. L., Casem, D. T., Bradley, J. M., Dwivedi, A. K., Brown, E. N., & Jordan, C. W. (2016). Mechanical Properties of Low Density Polyethylene. *Journal of Dynamic Behavior of Materials*, 2(4), 411–420. <https://doi.org/10.1007/s40870-016-0076-0>

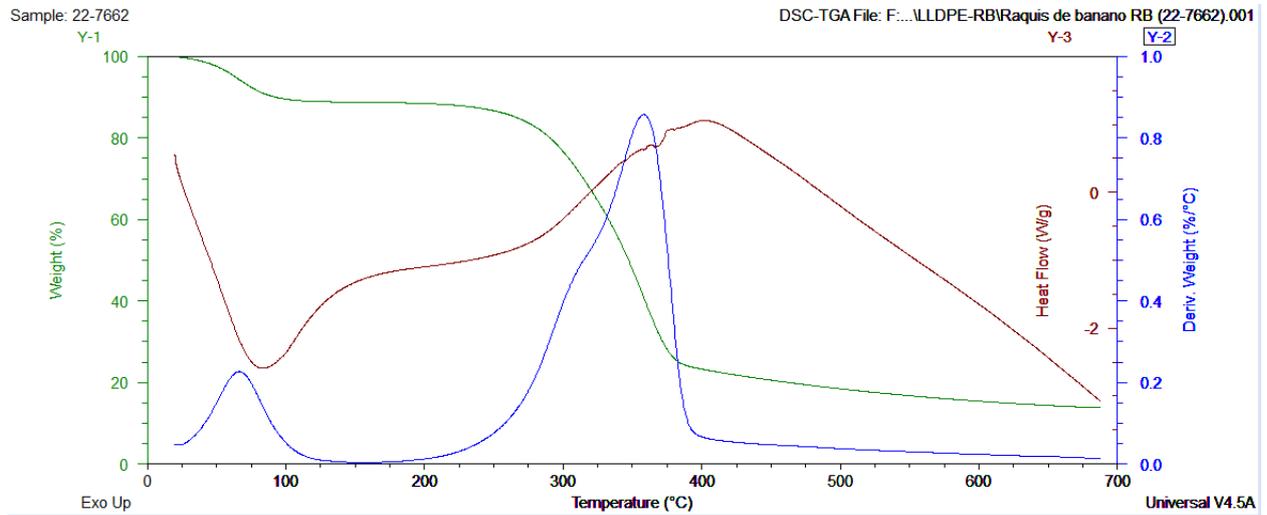
- Kenned, J. J., Kumar, C. S., & Sankaranarayanan, K. (2022). Evaluation of structural integrity of needle punched banana fiber reinforced industrial safety helmets: *Polymers and Polymer Composites*, 30, 1–14. <https://doi.org/10.1177/09673911221074889>
- Khanam, P. N., & AlMaadeed, M. A. A. (2015). Processing and characterization of polyethylene-based composites. *Advanced Manufacturing: Polymer and Composites Science*, 1(2), 63–79. <https://doi.org/10.1179/2055035915Y.0000000002>
- Ladany, S. P., & So, K. C. (1994). Optimal recycling of waste materials in a plastic extrusion production process. *European Journal of Operational Research*, 79(1), 13–24. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(94\)90392-1](https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)90392-1)
- Mazur, K., Jakubowska, P., Romańska, P., & Kuciel, S. (2020). Green high density polyethylene (HDPE) reinforced with basalt fiber and agricultural fillers for technical applications. *Composites Part B: Engineering*, 202, 108399. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2020.108399>
- McKeen, L. W. (2017). Production of Films, Containers, and Membranes. *Permeability Properties of Plastics and Elastomers*, 41–60. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-50859-9.00003-8>
- Murat, B. I. S., Kamalruzaman, M. S., Azman, M. H. N., & Misroh, M. F. (2020). Assessment of Mechanical Properties of Recycled HDPE and LDPE Plastic Wastes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 957(1), 0–7. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/957/1/012046>
- Ogunsile, B. O., & Oladeji, T. G. (2016). Utilization of banana stalk fiber as reinforcement in low density polyethylene composite. *Revista Materia*, 21(4), 953–963. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620160004.0088>
- Ovali, S., & Sancak, E. (2020). Investigation of Mechanical Properties of Jute Fiber Reinforced Low Density Polyethylene Composites. *Journal of Natural Fibers*, 00(00), 1–18. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1838999>
- Rosato, D. V., Rosato, D. V., & Rosato, M. V. (2004). EXTRUSION. *Plastic Product Material and Process Selection Handbook*, 227–281. <https://doi.org/10.1016/B978-185617431-2/50008-6>
- Sadeghi, B., Marfavi, Y., AliAkbari, R., Kowsari, E., Borbor Ajdari, F., & Ramakrishna, S. (2021). Recent Studies on Recycled PET Fibers: Production and Applications: a

- Review. *Materials Circular Economy*, 3(1). <https://doi.org/10.1007/s42824-020-00014-y>
- Silva, F. S., Ribeiro, C. E. G., Demartini, T. J. da C., & Rodríguez, R. J. S. (2020). Physical, Chemical, Mechanical, and Microstructural Characterization of Banana Pseudostem Fibers from *Musa Sapientum*. *Macromolecular Symposia*, 394(1), 1–8. <https://doi.org/10.1002/masy.202000052>
- Singh, S. K., & Dhepe, P. L. (2022). Alpha-, Beta- and Gamma-Cellulose Quantification and Two-Stage Concentrated-Dilute Acid Lignin Recovery from Three Rice Husks: Lignin Characterization and Depolymerization. *Waste and Biomass Valorization*, 13(6), 2963–2977. <https://doi.org/10.1007/s12649-022-01704-1>
- Spear, M. J., Eder, A., & Carus, M. (2015). Wood polymer composites. In *Wood Composites*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-454-3.00010-X>
- Vardhini, K. J. V., Murugan, R., Selvi, C. T., & Surjit, R. (2016). Optimisation of alkali treatment of banana fibres on lignin removal. *Indian Journal of Fibre and Textile Research*, 41(2), 156–160.
- Wang, Y., & Padua, G. W. (2003). Tensile Properties of Extruded Zein Sheets and Extrusion Blown Films. *Macromolecular Materials and Engineering*, 288(11), 886–893. <https://doi.org/10.1002/mame.200300069>
- Yang, J., Ching, Y. C., & Chuah, C. H. (2019). Applications of Lignocellulosic Fibers and Lignin in. *Polymers*, 11, 1–26.
- Zhang, J., Koubaa, A., Xing, D., Liu, W., Wang, Q., Wang, X. M., & Wang, H. (2020). Improving lignocellulose thermal stability by chemical modification with boric acid for incorporating into polyamide. *Materials and Design*, 191, 108589. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108589>

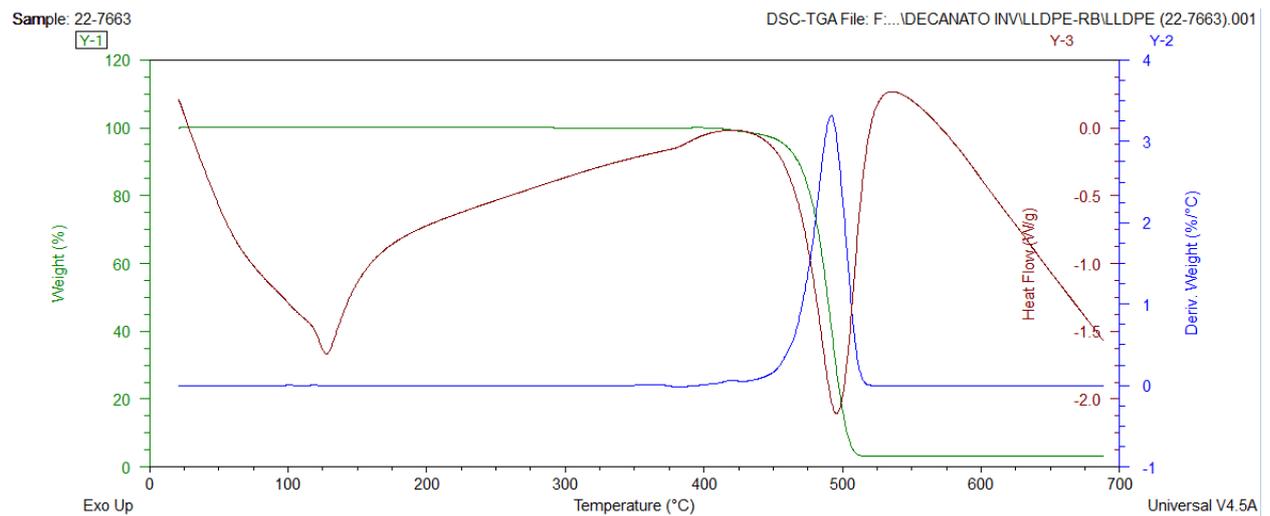
APÉNDICES

APÉNDICE A: Resultados TGA de muestras evaluadas

A.1 TGA de muestra de Raquis de Banano



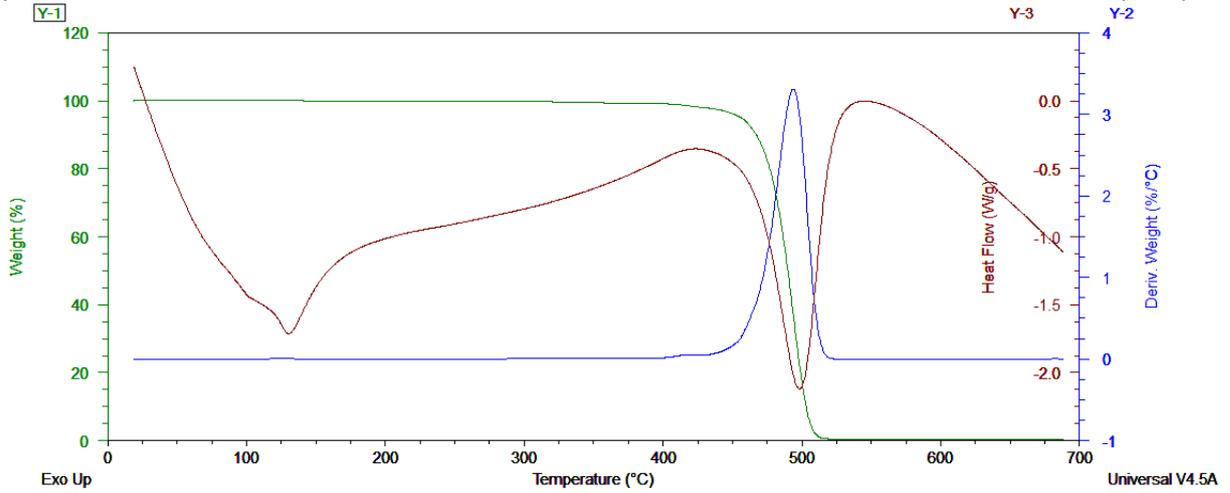
A.2 TGA de muestra de Polietileno de baja densidad



A.3 TGA de muestra de Polietileno de baja densidad con Raquis de banano en 1%

Sample: 22-7664

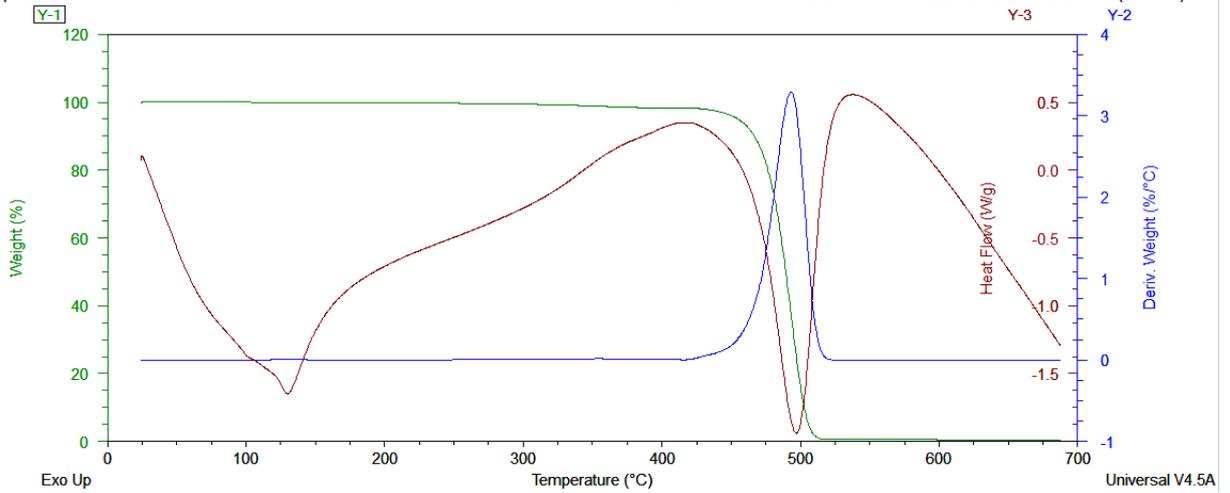
DSC-TGA File: F:\...IDECANATO INVLLDPE-RBLLDPE 1% RB (22-7664).001



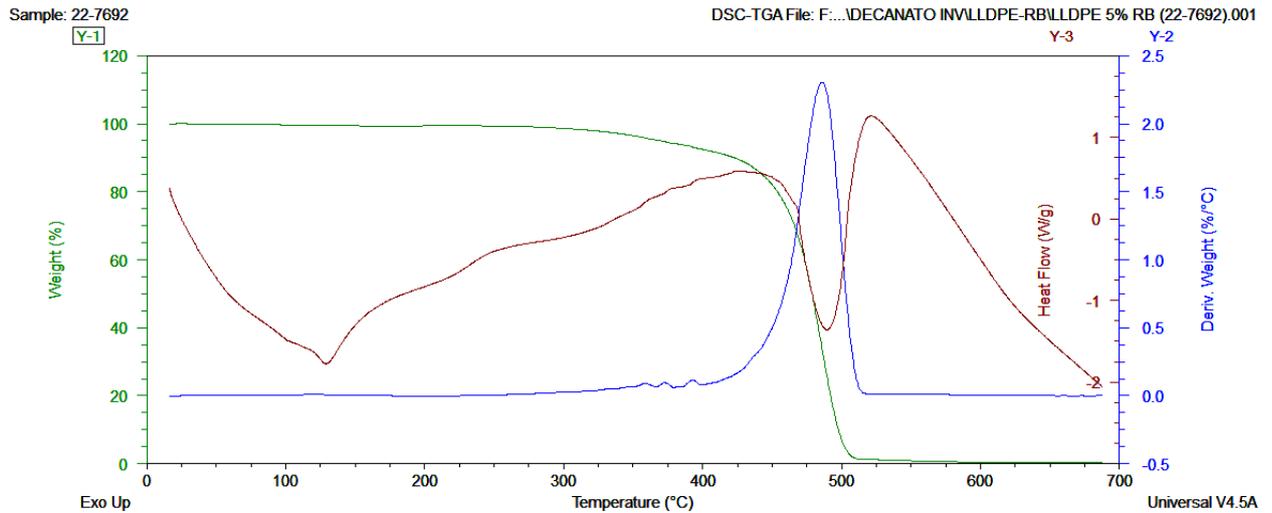
A.4 TGA de muestra de Polietileno de baja densidad con Raquis de banano en 2%

Sample: 22-7691

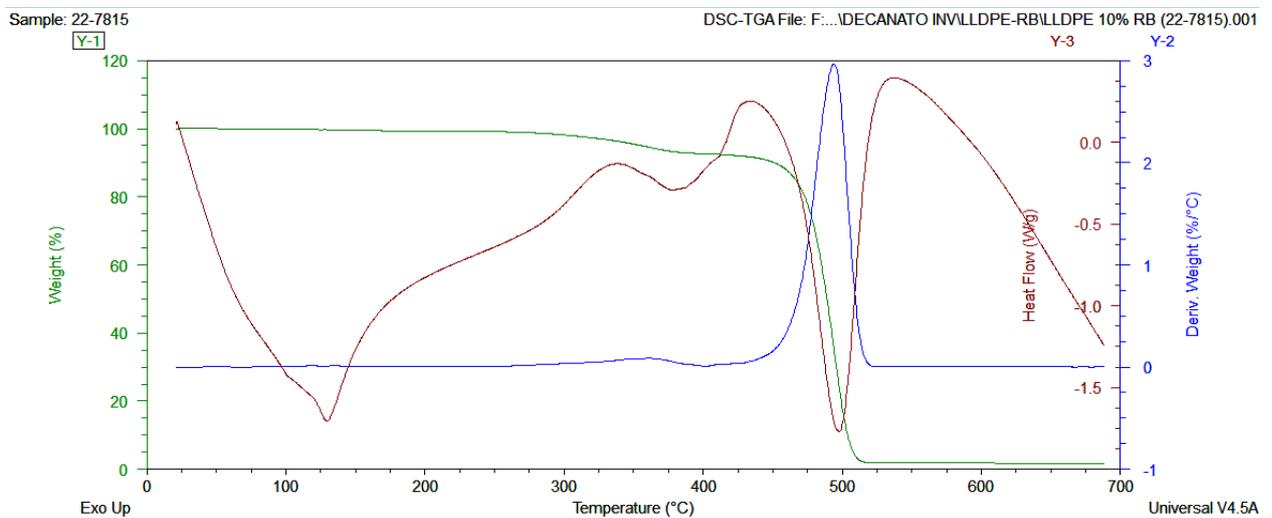
DSC-TGA File: F:\...IDECANATO INVLLDPE-RBLLDPE 2% RB (22-7691).001



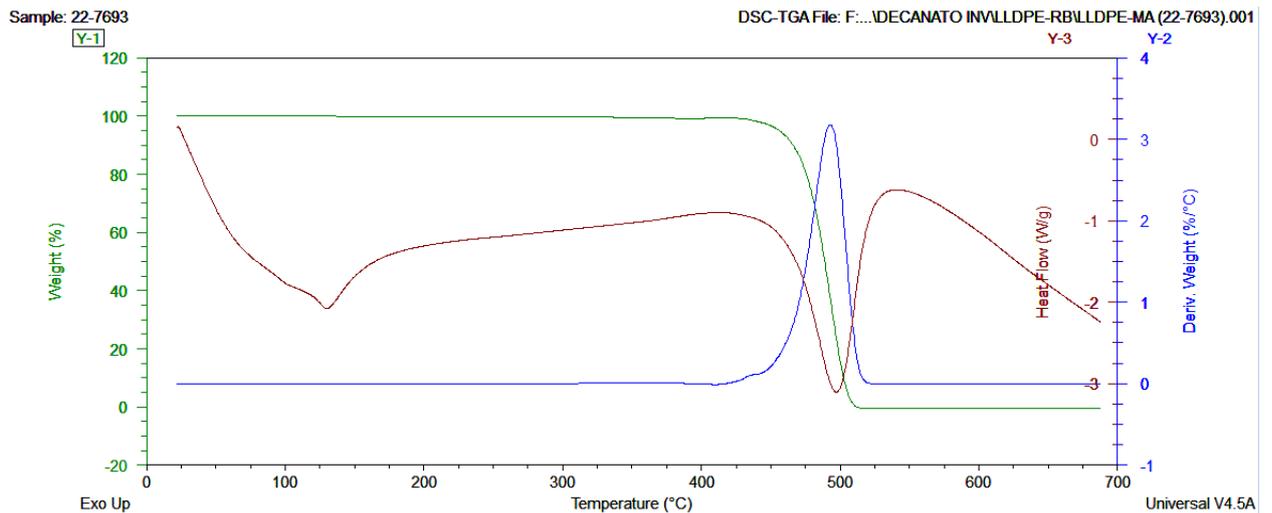
A.5 TGA de muestra de Polietileno de baja densidad con Raquis de banano en 5%



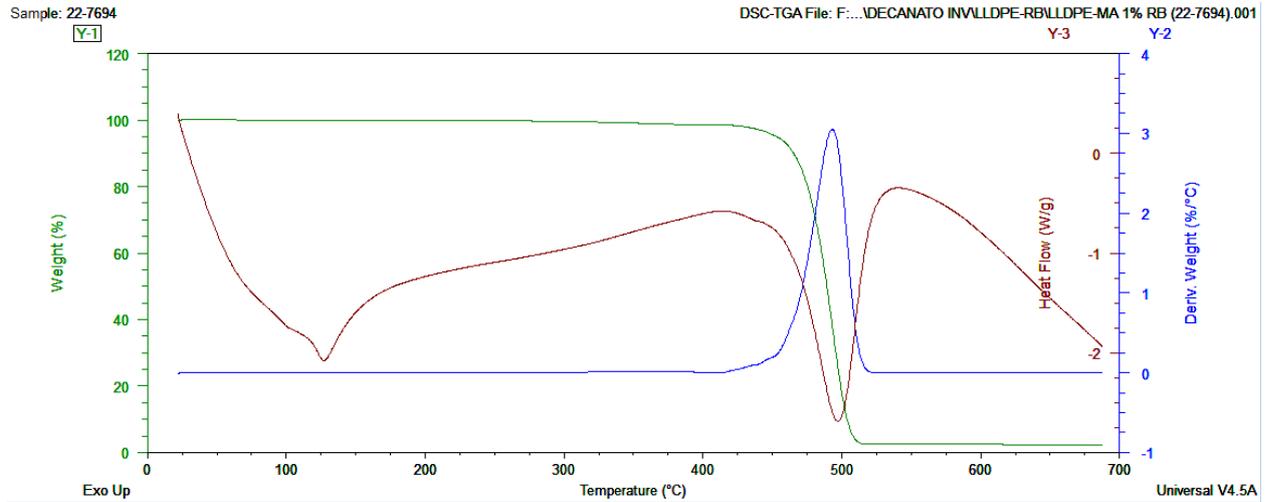
A.6 TGA de muestra de Polietileno de baja densidad con Raquis de banano en 10%



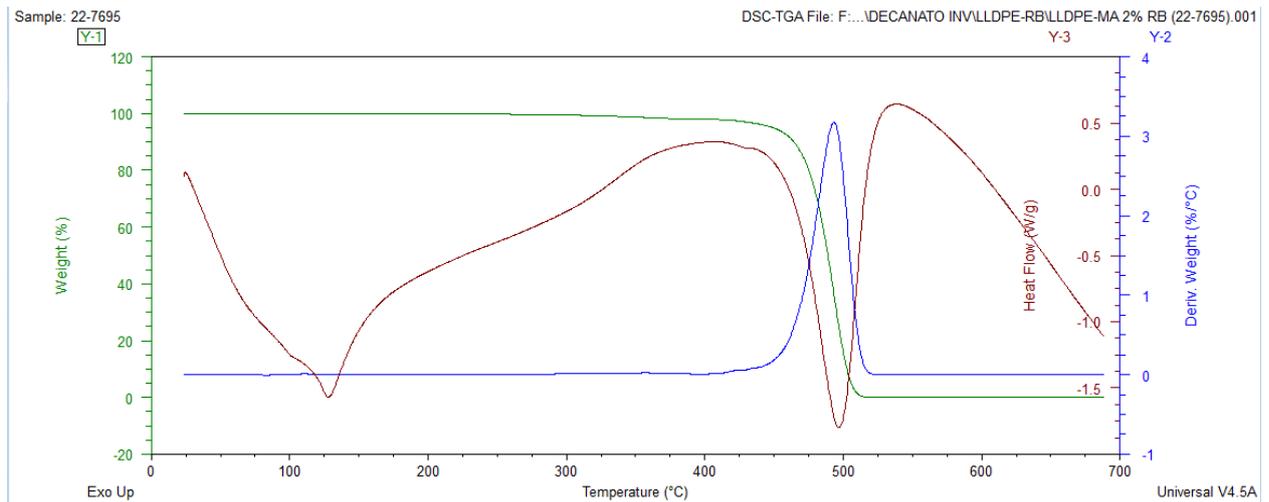
A.7 TGA de muestra de Polietileno de baja densidad con Anhídrido Maleico



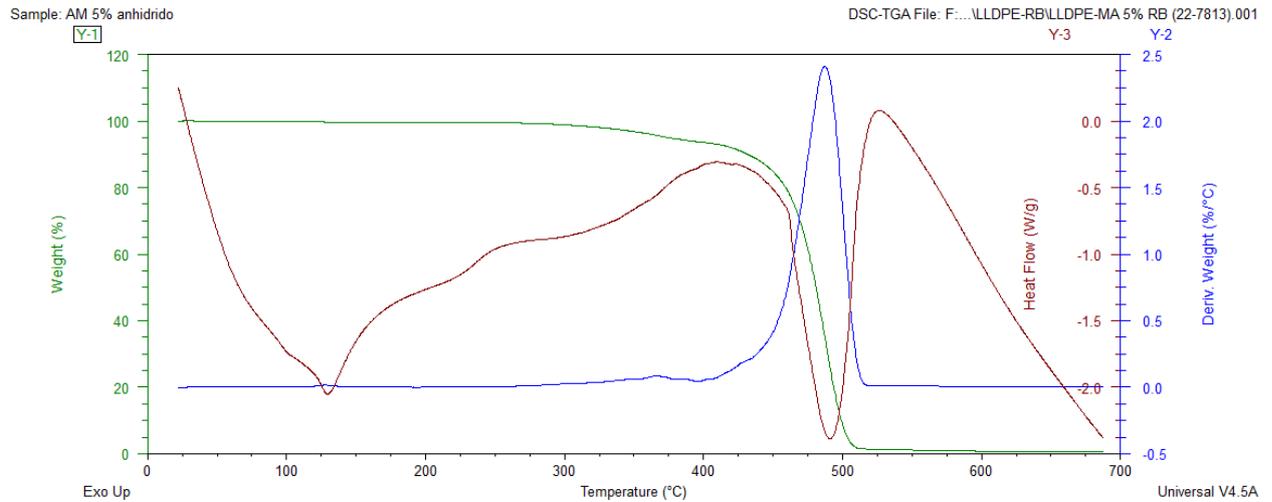
A.8 TGA de muestra de Polietileno de baja densidad con Anhídrido Maleico y Raquis de banano en 1%



A.9 TGA de muestra de Polietileno de baja densidad con Anhídrido Maleico y Raquis de banano en 2%



A.10 TGA de muestra de Polietileno de baja densidad con Anhídrido Maleico y Raquis de banano en 5%



A.11 TGA de muestra de Polietileno de baja densidad con Anhídrido Maleico y Raquis de banano en 10%

