# “PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y FUNCIONALES DE COMPUESTOS SUSTENTABLES BASE ALMIDÓN-PBAT Y POLVO DE LLANTA MODIFICADO.”

BAJO LA OPCION DE:
TITULACIÓN INTEGRAL
(TESIS PROFESIONAL)

PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA:
CÉSAR AUGUSTO REYES BAUTISTA

ASESOR:
MTRO.  FILEMÓN MONZALVO LICONA

ASESORES EXTERNOS:
DR. ISRAEL SIFUENTES NIEVES
DR. JOSÉ FRANCISCO HERNÁNDEZ GÁMEZ

SINODALES:
MTRO. CÉSAR RICARDO VARGAS MONROY
MTRA. DANIELA MÉNDEZ DÍAZ

Pachuca de Soto, Hgo. NOVIEMBRE 2025
61 páginas

Educación
Secretaría de Educación Pública

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Pachuca
Subdirección Académica

Pachuca de Soto, Hidalgo, 26/Septiembre/2025
No. de oficio: DIQyB/087/2025

Asunto: ACEPTACIÓN DE TEMA Y OPCIÓN

C. CÉSAR AUGUSTO REYES BAUTISTA
PRESENTE

Con el presente me permito informarle que el tema **"Propiedades fisicoquímicas y funcionales de compuestos sustentables base almidón-PBAT y polvo de llanta modificado"** ha sido **ACEPTADO** para ser presentado por la opción **TESIS PROFESIONAL** contemplada en la normatividad vigente para tal efecto.

Por lo anterior se le ha designado como asesor al **MTRO. FILEMÓN MONZALVO LICONA** como comisión revisora a la **MTRA. DANIELA MÉNDEZ DÍAZ y MTRO. CÉSAR RICARDO VARGAS MONROY.** Una vez hecha la revisión final se liberará por dicho comité para su impresión **ACTO DE RECEPCIÓN PROFESIONAL**

ATENTAMENTE
*Excelencia en Educación Tecnológica®*
*"El Hombre Alimenta el Ingenio en Contacto con la Ciencia"*

DRA. ALEJANDRA FLETES GÓMEZ
JEFE DEL DEPTO. DE ING. QUIMICA Y BIOQUÍMICA

EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PACHUCA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y BIOQUÍMICA

c.c.p. archivo
AFG/bfa

Educación
Secretaría de Educación Pública

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Pachuca
Subdirección Académica

Pachuca de Soto, Hidalgo, a 24 /Noviembre /2025
Oficio No. DIQyB/087/2025

ASUNTO: Liberación para el Acto de Recepción Profesional

C. CÉSAR AUGUSTO REYES BAUTISTA , No. de Control: 18201029
Egresado del Programa Educativo de Ingeniería Química y Bioquímica
PRESENTE

Por este medio informo que ha sido liberado el siguiente proyecto para la titulación integral:

| | |
|---|---|
| Nombre del proyecto: | "Propiedades fisicoquímicas y funcionales de compuestos sustentables base almidón-PBAT y polvo de llanta modificado" |
| Producto: | (TESIS PROFESIONAL) |

Sin otro particular, quedo de usted.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica
"El Hombre Alimenta el Ingenio en Contacto con la Ciencia"

DRA. ALEJANDRA FLETES GÓMEZ
JEFA DEL DEPTO. DE ING. QUÍMICA Y BIOQUÍMICA

EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PACHUCA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y BIOQUÍMICA

c.c.p.- Expediente.
AFG/bfa

ITPAC-AC-PO-008-06



2025 Año de La Mujer Indígena

Carretera México-Pachuca Km. 87.5, Col. Venta Prieta
C.P. 42083 Pachuca de Soto, Hidalgo.
Tels. 771 7113073, 771 7113596, 771 7113140, 771 7115119 y 771 7113399
e-mail:ciquimica@pachuca.tecnm.mx | www.pachuca.tecnm.mx







## Agradecimientos

Primeramente agradezco a mi madre Olga Lidia Bautista Antonio por darme la vida, la educación y todo su amor, un apoyo incondicional, incomparable e inigualable, el cual nunca terminare de agradecer hasta mi último día en esta tierra, gracias por tus consejos, por tus regaños, por tu tolerancia, por tu preocupación hacia mí, agradezco a la vida por asignarte como mi madre en este mundo, eres la mejor mamá TE AMO con todo mi corazón y mi ser, gracias por estar para mí, gracias por tus palabras de aliento los días que siento que ya no puedo seguir, por ser comprensiva, una mujer muy amable TE AMO otra vez, gracias también por todas las comidas que me has preparado, gracias por ser un ejemplo de superación a seguir, eres esa estrella que espero alcanzar y como sé que tú lo deseas.

Agradezco a mi hermana Dxenih Reyes Bautista, mi segunda madre, gracias por ser la mejor hermana mayor del mundo, gracias por tu amor, tu apoyo, tu amistad y tu comprensión, gracias por quererme como lo haces TE AMO, gracias por ser mi confidente en algunas cosas, por ayudarme en la carrera, gracias por escucharme y preocuparte por mí, eres mi ejemplo a seguir, admiro tu ser y hasta dónde has llegado en la vida y como sigues adelante a pesar de las adversidades, amo tu fuerza, eres una mujer que ama lo que hace, ese es mi máximo ejemplo de metas a alcanzar en la vida, gracias por eso y por todo, al igual que con mi mamá, nunca terminare de agradecerte.

Agradezco a mi sobrino Agustín Eduardo Chávez Reyes, por ser mi razón más grande en el mundo por la cual no me rindo, te amé y te amo desde el día en que llegaste a este mundo, gracias por tu amor y amistad, por ser un niño bueno y muy inteligente, por quererme a pesar de todos mis defectos, eso nunca te lo voy a terminar de agradecer, gracias mi pequeño Lalito TE AMO, por ti nunca dejare de luchar y perseverar por llegar a la cima.

Agradezco a mi padre Agustín Reyes Antonio por darme la vida y su apoyo económico en esta etapa universitaria, así como también agradezco a la vida por habérmelo asignado como padre y nacer en la cuna de la cultura indígena, admiro y respeto tu trayectoria profesional, es una fuente enorme de inspiración, gracias por haber llegado tan lejos, seguiré tus pasos para preservar nuestra cultura.

De igual manera agradezco a mis abuelos paternos y maternos, un abrazo y un beso a mis 2 abuelas que están en el cielo, gracias por haber existido sin ustedes no estaría aquí.

Agradezco a una mujer muy especial en mi vida llamada Itzel Guadalupe, gracias por tu amor, tu tiempo y comprensión, eres una niña muy linda en todos los aspectos, gracias por estar en los momentos bonitos y difíciles de mi vida, a pesar de todo te voy a querer siempre y amar como persona, gracias por todo lo que

has hecho y haces por mí, tienes un lugar en mi corazón, te agradezco haces que mi vida sea más bonita GRACIAS bonita.

Agradezco a mis amigos que hice en la universidad por su apoyo y amor, conocí a personas sorprendentes cada una perfecta a su manera, con cada una pase momentos inolvidables, quiero a todos por igual pero si alguien tiene el mérito de que su nombre salga en mis agradecimientos, es mi primer amigo de la universidad Leonardo Miguel Mariscal Rivero, gracias por todo amigo mío, gracias por tu amistad, por tu cariño, por compartirme a tu familia, por ser la persona más bondadosa que conozco, sin ti nunca hubiera llegado tan lejos en la universidad, agradezco también a tu hermana Kenia Jailynne por esa llamada en pandemia cuando yo pretendía salirme de la universidad gracias por tus palabras de orientación y darme otro panorama de la vida, nunca lo olvidare muchas gracias por eso, probablemente sin ustedes ni siquiera estuviera aquí , en este punto de culminar la universidad, gracias por todo, los quiero mucho.

Este párrafo se lo dedico a mi rayo de luz en la oscuridad, la persona que estuvo conmigo en los últimos días de la universidad donde cada día era un reto y parecía eterno, sin embargo las tardes eran preciosas, es esa persona que considero mi hermana de otra madre, gracias por todo Arely Fragoso, te quiero siempre y siempre es hoy, estoy eternamente agradecido.

Por ultimo pero no menos importante gracias a mis amigos y compañeros, Zuri Cerón y Ernesto García, por ser las mejores personas que pude tener como compañeros de residencia, gracias por hacer de los días más a menos, por convertir un día aburrido en divertido, gracias por sus tips para la tesis y la vida, gracias Zuri por ser la mejor roomie, por cocinar rico, gracias por tu disciplina y determinación para el gimnasio, así como gracias por tus ánimos y tus consejos te quiero mucho, también gracias Ernesto por ser un buen discípulo en el gimnasio por dejarte moldear y no ceder, ¡ nunca cedas ¡, nunca cedan amigos míos, que van a llegar muy lejos en la vida, los quiero mucho a ambos. GRACIAS.

Agradezco al Centro de investigación de Química Aplicada (CIQA) por permitirme hacer mi residencia en sus instalaciones.

Le doy gracias a mis asesores, el Dr. Francisco Hernández Gámez y el Dr. Israel Sifuentes Nieves por su asesoría, por sus consejos tanto a nivel profesional, como a nivel personal, por tenerme paciencia y resolver mis dudas, por sus explicaciones detalladas y creativas. De igual manera le doy gracias al Dr. Pablo por su ayuda en la búsqueda de información para complementar mi marco teórico.

A la L. C. Q Julieta Sánchez Salazar por la facilitación del equipo FTIR, a la Q.F.B. Myriam Lozano por su apoyo en el microscopio óptico y a la M. C. Myrna Salinas Hernández Estrada por su ayuda en la preparación de mis muestras para DMA y TGA.

Al Dr. Víctor Javier Cruz con las cámaras de mezclado y las prensas, al Dr. Jesús Francisco Lara por el equipo de laboratorio utilizado.

Sin dejarlo pasar doy gracias a un gran profesional y ser humano que sin dudarlo y con paciencia me ayudo en el laboratorio, también me explico a como interpretar los datos de mis experimentos , muchísimas gracias Yeltsin Omar, el ser humano más noble que he conocido.

Agradezco a la vida y a Dios, por ser una serie de circunstancias que me posicionan en el lugar en donde estoy, soy fiel creyente que no existen las casualidades y todo pasa por algo. GRACIAS.

Finalmente agradezco a los proyectos LANIAUTO, CONAHCYT 321156, al proyecto interno CIQA 6740 titulado “Desarrollo de compuestos a base de hule (natural y/o sintético) con polvo de llanta tratado por microondas” y al Proyecto aprobado por la SECIHTI 2025 CBF-2025-I-1648 “Valorización de las Llantas Recicladas mediante el Proceso de Microondas para la Formulación de Compuestos de Hule en el marco de la Economía Circular, por las facilidades otorgadas para desarrollar este trabajo de Tesis.

## Resumen

En el presente trabajo se modificó el polvo de llanta mediante un lavado con acetona por 24 horas, este polvo tratado fue mezclado con almidón (S) y polibutileno adipato-co-tereftalato (PBAT) en una cámara Brabender, también se obtuvieron compuestos bajo el mismo proceso incorporando el polvo de llanta sin modificar. Se evaluaron las propiedades estructurales mediante espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier, (FTIR), térmicas a través del análisis termo gravimétrico (TGA), morfológicas por microscopia electrónica de barrido (SEM) y mecánicas con ayuda del análisis dinámico mecánico (DMA) y tensión elongación de las placas que contenían el polvo de llanta modificado y no modificado. El análisis estructural y térmico reveló que el tratamiento con acetona removió algunos aditivos presentes en el polvo de neumático lo que genero microcavidades en el polvo. Los compuestos que contenían polvo de llanta modificado en concentraciones de 30% y 50% mostraron una mejora en las propiedades mecánicas del 16% y 18%, respectivamente, promovido por una mejora en la adhesión interfacial entre el polvo de llanta y la matriz polimérica tal como se pudo corroborar en los análisis SEM.

## Abstract

In the present work, the tire powder was modified with acetone for 24 hours. The treated powder was added to starch (S) and poly (Butylene Adipate-co-Terephthalate) (PBAT) matrices and mixed in a Brabender chamber. The structural properties were evaluated by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), thermal through thermos-gravimetric analysis (TGA), morphological by scanning electron microscopy (SEM) and mechanical with the help of dynamic mechanical analysis (DMA) and tension-elongation of the plates containing the modified and unmodified tire powder. The structural and thermal analysis revealed that the acetone treatment removed some additives present in the tire dust which gives rise to microcavities in the GTR. The composites containing modified tire powder at 30 and 50 wt. % showed an improvement in mechanical properties of 16% and 18% respectively, indicating an enhancement in the interfacial adhesion between the tire powder and the polymer matrix as could be seen in the SEM analysis.

# Índice de contenido

**Agradecimientos** ..... i

**Resumen** ..... iv

**Abstract** ..... v

Índice de contenido ..... vi

Índice de figuras ..... ix

Índice de tablas ..... x

Abreviaturas y simbología ..... xi

1. GENERALIDADES ..... 1

1.1 Introducción ..... 1

1.2 Problemas a resolver ..... 2

1.3 Objetivos ..... 3

1.4 Hipótesis ..... 3

1.5 Justificación ..... 3

2. MARCO TEÓRICO ..... 4

2.1 Composición de los neumáticos ..... 4

2.2 Métodos de reciclaje de neumáticos y sus aplicaciones ..... 7

2.2.1 Recauchutado ..... 8

2.2.2 Recuperación de energía ..... 8

2.2.3 Recuperación de materiales ..... 9

2.3 Polvo de llanta ..... 10

2.3.1 Métodos de obtención de obtención de polvo de llanta ..... 10

2.3.2 Diferentes métodos de molienda ..... 11

2.3.3 GTR (Polvo de llanta) en mezclas ..... 12

2.3.4 Modificación del GTR ..... 13

2.3.5 Solventes ..... 14

2.3.6 Métodos de desvulcanización del caucho ..... 16

2.3.7 Clasificación del caucho en polvo ..... 17

2.4 Almidón ..... 18
2.4.1 Composición ..... 18
2.4.2 Estructura del gránulo del almidón ..... 20
2.4.3 Propiedades fisicoquímicas ..... 20
2.4.4 Gelatinización del almidón ..... 21
2.4.5 Retrogradación del almidón ..... 21
2.4.6 Cristalinidad del almidón ..... 21
2.5 PBAT ..... 22
2.5.1 Síntesis del PBAT ..... 22
2.5.2 Propiedades del PBAT ..... 23
2.6 Compuestos poliméricos que contienen G/PBAT/Almidón ..... 29
3. DESARROLLO ..... 35
3.1 Materiales ..... 35
3.1.1 Polvo de llanta ..... 35
3.1.2 Almidón ..... 35
3.1.3 PBAT ..... 35
3.2 Métodos ..... 35
3.2.1 Lavado del polvo de llanta ..... 35
3.2.2 Formulado de muestras para la cámara Brabender ..... 36
3.2.3 Procesado de compuestos ..... 37
3.2.4 Moldeo mediante compresión ..... 37
3.2.5 Suaje de placas ..... 38
3.3 Técnicas de caracterización ..... 38
3.3.1 FTIR ..... 38
3.3.2 TGA ..... 38
3.3.3 DMA ..... 39

3.3.4 Propiedades mecánicas de las películas ..... 39
3.3.5 SEM ..... 39
4. RESULTADOS ..... 40
4.1. Caracterización del polvo de llanta ..... 40
4.2. Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) ..... 40
4.3. Análisis termogravimétrico (TGA) ..... 41
4.4. SEM ..... 43
4.5. Ángulo de contacto ..... 44
4.6. Caracterización de los compuestos ..... 45
4.6.1. FTIR de los compuestos ..... 45
4.6.2. TGA de los compuestos ..... 46
4.6.3. DMA ..... 48
4.6.4. Torque vs tiempo ..... 49
4.6.5. Propiedades mecánicas ..... 51
4.6.6. SEM COMPUESTOS ..... 53
5. CONCLUSIÓN ..... 55
RECOMENDACIONES ..... 56
BIBLIOGRAFÍA. ..... 57
ANEXO. ..... 61

# Índice de figuras

Figura 2.1 Cauchos que podrían presentarse en la composición de algunos neumáticos, obtenida de (Bockstal et al., 2019). Fuente: (Bockstal et al., 2019) ..... 5
Figura 2.2 Estructura química de (a) caucho natural y (b) caucho vulcanizado; las moléculas amarillas representan las cadenas cruzadas que han sido formadas por átomos de azufre. Fuente: (Rowhani & Rainey, 2016)..... 7
Figura 2.3 Flujo de utilización de neumáticos de desecho. Creación propia C. Reyes, 2024 ..... 7
Figura 2.4 Recauchutado de neumáticos. Fuente: (Barrero 2021).. 8
Figura 2.5 Pirolisis (Recuperación de energía). Fuente: (Tnu, 2023)..... 9
Figura 2.6 Recuperación de materiales de neumáticos desechados. Fuente: (Tnu, 2023) ..... 10
Figura 2.7 Diagrama de proceso obtención del polvo de llanta. Creación propia C. Reyes, 2024..... 11
Figura 2.8 Estructura química de la amilopectina. Fuente: (Khaikhum 2020) ..... 19
Figura 2.9 Estructura química de la amilosa. Fuente: (Khaikhum(2020) ..... 19
Figura 2.10 Estructura del granulo de almidón. Fuente: (Science in School, 2010). ..... 20
Figura 2.11 Síntesis del PBAT. Fuente: (Okada, 2011) ..... 23
Figura 2.12 Pruebas PBAT. Fuente: (Jian et al., 2020). ..... 25
Figura 2.13 Aplicaciones de productos basados en PBAT. Fuente: (Jian et al., 2020). ..... 28
Figura 2.14 Micrografía SEM de espumas EVA/GTR.(A) Micrografía SEM de compuesto de espuma polimérica (referencia); (B) Micrografía SEM de compuesto de espuma polimérica (GTR sin tratar con EVA/30); (C) Micrografía SEM de compuesto de espuma polimérica (GTR sin tratar EVA/40); (D) Micrografía SEM de compuesto de espuma polimérica (GTR tratado con EVA/30); (E) Micrografía SEM de compuesto de espuma polimérica (GTR tratado con EVA/40). Fuente: (Gámez et al., 2022)..... 30
Figura 2.15 Reacción decis-1,4-poliisopreno y anhídrido maleico. Fuente: (Nakason et al., 2004). ..... 32
Figura 3.1 Equipo Soxhlet. Creación propia C. Reyes, 2024 ..... 36
Figura 3.2 Secado de cartuchos. Creación propia C. Reyes, 2024 ..... 36
Figura 3.3 Suaje tipo I. Creación propia C. Reyes, 2024 ..... 38
Figura 3.4 Suajador. Creación propia C. Reyes, 2024..... 38
Figura 4.1 Espectro FTIR del G y el MG. Creación propia C. Reyes, 2024..... 41
Figura 4.2 Termogramas de pérdida de peso. Creación propia C. Reyes, 2024 ..... 42
Figura 4.3 Termogramas de G y MG. Creación propia C. Reyes, 2024..... 42
Figura 4.4 Micrografías SEM de polvo de llanta modificado y no modificado a) G a 250 x, b) MG a 250 x, c) G a 500 x, y d) MG a 500 x. Creación propia C. Reyes, 2024 ..... 43
Figura 4.5 Ángulo de contacto del GTR sin modificar (G) y modificado (MG). Creación propia C. Reyes, 2024 ..... 44

Figura 4.6 Espectro FTIR de las mezclas de PBAT/S/GTR. Creación propia C. Reyes, 2024 ..... 45
Figura 4.7 Termogramas de compuestos de G/MG/PBAT/S. Creación propia C. Reyes, 2024 ..... 47
Figura 4.8 Termograma de pérdida de peso de compuestos de G/MG/PBAT/S. Creación propia C. Reyes, 2024 ..... 48
Figura 4.9 Módulo de almacenamiento de compuestos con G/MG/PBAT/S. Creación propia C. Reyes, 2024 ..... 49
Figura 4.10 Curvas de Torque- tiempo de las películas de G/MG/PBAT/S. Creación propia C. Reyes, 2024 ..... 50
Figura 4.11 Propiedades mecánicas de los compuestos. Creación propia C. Reyes, 2024 ..... 52
Figura 4.12 Micrografia SEM de los compuestos. a) Control a 500 x b) G10 a 500 x c) MG10 a 500x d) G30 a 500x e)MG 30 a 500x f) G50 a 500x g)MG 50 a 500x. Creación propia C. Reyes, 2024 ..... 54

## Índice de tablas

Tabla 2.1 Composición del neumático según el tipo. Fuente: (Rodríguez, 2016). ..... 4
Tabla 2.2 Composición química de la llanta. Fuente: (Rodríguez, 2016) ..... 5
Tabla 2.3 Diferentes condiciones de molienda. Creación propia C. Reyes, 2024 ..... 12
Tabla 2.4 Clasificación, fabricación y utilización del caucho en polvo. Fuente: (Fang et al., 2001) ..... 18
Tabla 2.5 Propiedades mecánicas del PBAT. Creación propia C. Reyes, 2024 ..... 26
Tabla 3.1 Porcentaje en peso de las muestras. Creación propia C. Reyes, 2024 ..... 37
Tabla 4.1 Intervalos de frecuencia (FTIR). Creación propia C. Reyes, 2024 ..... 40
Tabla 4.2 Pérdida (%) de peso del control y compuestos. Creación propia C. Reyes, 2024 ..... 47
Tabla 4.3 Energía específica y tiempo de fusión de las mezclas procesadas. Creación propia C. Reyes, 2024 ..... 50

# Abreviaturas y simbología

**GTR-** Polvo de llanta.

**G-** Polvo de llanta no modificado.

**MG-** Polvo de llanta modificado.

**PBAT**- Polibutileno adipato-co-teraftalato.

**S-** Almidón.

**PBAT/S/MG/10-** Mezcla de PBAT, almidón y polvo de llanta modificado al 10%.

**PBAT/S/MG/30-** Mezcla de PBAT, almidón y polvo de llanta modificado al 30%.

**PBAT/S/MG/50-** Mezcla de PBAT, almidón y polvo de llanta modificado al 50%.

**PBAT/S/G/10-** Mezcla de PBAT, almidón y polvo de llanta sin modificar al 10%.

**PBAT/S/G/30-** Mezcla de PBAT, almidón y polvo de llanta sin modificar al 30%.

**PBAT/S/G/50-** Mezcla de PBAT, almidón y polvo de llanta sin modificar al 50%.

**FTIR-** Espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier.

**TGA-** Análisis termogravimétrico.

**SEM-** Espectroscopía electrónica de barrido.

**DMA-** Análisis mecánico dinámico

# 1. GENERALIDADES

## 1.1 Introducción

Hoy en día se producen más de mil millones de neumáticos al año a nivel mundial, en más de 400 fábricas (Bulei et al., 2018) y las estimaciones sugieren que esta cifra podría superar los 2,500 millones de toneladas en 2025 (Pathak & Sinha, 2021). La principal fuente de llantas de desecho es la industria automotriz, se estima que menos de 7% de los 300 millones de neumáticos usados generados anualmente, se convierten en productos nuevos y alrededor del 11% se convierten en electricidad, sin embargo, más del 77% están almacenados, enterrados o abandonados (Bulei et al., 2018). En México se desechan cada año más de 25,000,000 de llantas, esto produce más de 250,000,000 kg de material de desecho, equivalente a 3 millones de barriles de combustóleo (Rius et al., 2011). Desafortunadamente, al terminar su vida útil, los neumáticos se convierten en residuos o desechos que, sin un buen tratamiento, son contaminantes.

El problema de la contaminación que provoca un neumático desechado en el planeta ha llegado a magnitudes inaceptables, los vertederos, como la primera técnica de gestión de residuos, provocan riesgos para la salud y el medio ambiente al provocarse incendios incontrolables, contaminando los recursos hídricos subterráneos y generando focos de infección (Fazli & Rodrigue, 2020a). Esta problemática ha llevado a diversos sectores a crear distintos métodos de reutilización de los neumáticos desechados a través del reciclaje. Existen varios métodos para reciclar neumáticos desechados, la trituración y la molienda son técnicas clásicas comúnmente utilizadas (Pokorný et al., 2022), lo que da como resultado la obtención de caucho de neumáticos molido o polvo de llanta (GTR por sus siglas en ingles) que puede incorporarse a matrices poliméricas (Hejna et al., 2020) para reducir la dependencia de materiales a base de petróleo.

En la actualidad, esta alternativa de reciclaje ha cobrado gran popularidad. Los trabajos reportados muestran resultados favorables en diversas aplicaciones tales como el uso de caucho de neumáticos de desecho en mezclas de pavimentación asfáltica y hormigón de cemento (Shu & Huang, 2014), mezcla de concreto asfáltico modificado con polímeros que contiene 6% de polvo de caucho granulado y 3% de resina epoxi (Kim & Le, 2023) compuestos plásticos (Wang et al., 2018) y compuestos de caucho (Araujo et al., 2019), en donde se ha encontrado una segunda oportunidad a los desechos de neumáticos que permite el desarrollo de compuestos de caucho de estireno-butadieno auto-reparables y sostenibles. Aunque los neumáticos de desecho tienen un alto poder calorífico para ser utilizados como combustible, estos materiales son más rentables y ecológicos como relleno activo o inactivo (agentes endurecedores para termoplásticos, termoestables y cauchos).

En general, la adición de cargas a matrices poliméricas busca alcanzar dos metas principales la primera se relaciona con la disminución del costo de los materiales, lo cual es muy común en productos que no necesitan cumplir con altos estándares de rendimiento mecánico o térmico (Dixit et al., 2017), el segundo objetivo es mejorar las características de diversos materiales, como la resistencia a la tracción, la tenacidad o las propiedades de absorción acústica (De Leon et al., 2016).

La incorporación de partículas de GTR en matrices poliméricas puede clasificarse en ambas categorías. En términos de costo, el caucho molido de neumáticos es generalmente más económico que los compuestos utilizados en la fabricación de resinas epoxi, poliuretanos (PU) y otros plásticos termoestables, incluso cuando se considera la modificación o funcionalización previa de las partículas del polvo de llanta. El polvo de llanta posee gran potencial para ser implementado como agente reforzante en una matriz polimérica y obtener materiales poliméricos con valor agregado, el problema radica en su baja adhesión interfacial, debido a los métodos de su fabricación específicamente los enlaces que se crean durante la vulcanización. Es por ello que se han desarrollado métodos de compatibilización entre el GTR y las matrices poliméricas.

## 1.2 Problemas a resolver

- **Reducción de residuos plásticos no biodegradables**: Los plásticos derivados del petróleo, como el polipropileno, polietileno y policarbonato, tardan más de 100 años en degradarse, contribuyendo significativamente a la contaminación ambiental. Al desarrollar materiales biodegradables, como las biopelículas de almidón-PBAT, se podrá reducir la cantidad de residuos plásticos persistentes en el medio ambiente.
- **Desarrollo de empaques sostenibles**: Al utilizar almidón, un polímero biodegradable y fácilmente disponible, se promueve el uso de recursos renovables en lugar de fuentes provenientes del petróleo, lo cual es más sostenible a largo plazo.
- **Aprovechamiento de residuos de llantas**: La adición de polvo de llanta tratado no solo mejora las propiedades funcionales de las biopelículas de almidón, sino que también proporciona una solución para el reciclaje de llantas usadas, que de otro modo son difíciles de gestionar y representan un problema ambiental.
- **Mejora de las propiedades del almidón**: Aunque el almidón es biodegradable y tiene buena procesabilidad, su naturaleza hidrofílica y su pobre resistencia al agua limitan su aplicación en empaques. La incorporación de polvo de llanta tratado puede mejorar la resistencia al agua y la durabilidad de las biopelículas, haciendo que sean más adecuadas para aplicaciones de empaque.
- **Innovación en materiales de empaque**: La combinación de almidón con polvo de llanta tratado puede resultar en nuevos materiales con propiedades únicas que superen las limitaciones de los

materiales tradicionales, ofreciendo alternativas viables y competitivas para la industria del empaque y posiblemente otras aplicaciones.

## 1.3 Objetivos

**Objetivo general:** Evaluar el efecto del polvo de llanta modificado sobre las propiedades fisicoquímicas y funcionales de biopelículas de almidón/PBAT, a través de diversas técnicas de caracterización, para desarrollar nuevos compuestos parcialmente biodegradables.

**Objetivos específicos:**

1. Modificar el polvo de llanta mediante diversos lavados con acetona, para mejorar su interacción con las matrices poliméricas.
2. Evaluar las propiedades estructurales del polvo de llanta modificado, mediante diversas técnicas de caracterización (TGA, Ángulo de contacto, FTIR, SEM), para corroborar la modificación superficial.
3. Determinar las condiciones de procesamiento a través de un diseño de experimentos, para elaborar un compuesto del PBAT-almidón-polvo de llanta modificado.
4. Evaluar las propiedades físico-mecánicas y funcionales de los biocompuestos obtenidos, mediante Tensión-elongación, DMA, Torque tiempo, FTIR, etc., para elucidar las interacciones entre los diversos componentes del biocompuesto.

## 1.4 Hipótesis

La modificación del polvo de llanta mediante lavados con acetona mejorará sus propiedades estructurales, permitiendo su integración efectiva en la matriz polimérica de almidón-PBAT.

## 1.5 Justificación

La industria del empaque generalmente utiliza plásticos derivados del petróleo como el polipropileno, polietileno, policarbonato entre otros los cuales pueden llegar a tardar más de 100 años en degradarse, es por ello que en la actualidad se busca desarrollar nuevas alternativas a base de materiales biodegradables, ya que estos se degradan en cortos periodos de tiempo. Entre estos materiales destaca el almidón, el cual es un polímero fácilmente disponible, biodegradable y posee buena procesabilidad, sin embargo, es hidrofílico y tiene una pobre resistencia al agua y el PBAT el cual es un polímero biodegradable y flexible, posee una alta resistencia a la tracción y al desgarro, similar a los plásticos convencionales, y su biodegradabilidad, lo hace una opción atractiva para aplicaciones sostenibles, como bolsas de basura y envases de alimentos, el problema radica en que es hidrofóbico lo que dificulta la formación de una mezcla. Para disminuir estas desventajas se adicionará el polvo de llanta tratado para promover mejores interacciones entre fases, e incrementar las propiedades funcionales de las biopelículas.

# 2. MARCO TEÓRICO

## 2.1 Composición de los neumáticos

La composición varía dependiendo del tipo de llanta y del fabricante, los neumáticos se componen de 40 a 50 % de material polimérico (como estireno-butadieno), 30 a 35 % de rellenos (como negro de carbón), 15 % de suavizantes (como aceite y resina), 2 a 5 % de agentes de vulcanización (como compuestos que contienen azufre) y entre un 5 y un 10 % de aditivos (como hexametoximetilmelamina o HMMM), lo que les confiere una composición química compleja (Sommer et al., 2018). Básicamente un neumático es un compuesto textil/cuerda de acero/caucho, donde los cordones de acero y tela refuerzan los compuestos de caucho y son la principal estructura de soporte de carga dentro del neumático.

El caucho usado es muy difícil de reciclar por las siguientes razones principales (Lapkovskis et al., 2020):

- La presencia de una red tridimensional formada durante la vulcanización.
- La variedad de formulaciones de compuestos de caucho.
- La compleja estructura de los productos de caucho.

Las cadenas de polímeros del caucho se curan comúnmente con azufre durante la vulcanización, formándose enlaces químicos de alta energía. La red tridimensional hace que el caucho sea capaz de sufrir altas deformaciones reversibles esta red tridimensional impide que el caucho se disuelva, por lo que en algunos disolventes el caucho sólo se hincha de forma limitada. La complejidad de la molienda y la insolubilidad hacen imposible destruir químicamente los enlaces formados (Lapkovskis et al., 2020).
De manera general, los componentes se muestran en la Tabla 2.1 y su composición química en la Tabla 2.2.

*Tabla 2.1 Composición del neumático según el tipo. Fuente: (Rodríguez, 2016).*

| **Componentes** | **Composición** | |
|---|---|---|
| | **Llanta de carro liviano** | **Llanta de camión** |
| Caucho natural | 14% | 27% |
| Caucho sintético | 27% | 14% |
| Negro de humo (carbono) | 28% | 28% |
| Acero | 14-15% | 14-15% |
| Otros aditivos | 16-17% | 16-17% |
| Peso promedio (óxidos, etc.) | 8,6% | 45,4% |

*Tabla 2.2 Composición química de la llanta. Fuente: (Rodríguez, 2016)*

| Elemento o compuesto | Composición |
|---|---|
| Carbono ( C ) | 70% |
| Hidrógeno (H) | 7% |
| | |
| Azufre (S) | 1,3% |
| Cloro (Cl) | 0,2-0,6 % |
| Hierro (Fe) | 15% |
| Óxido de zinc (ZnO) | 2% |
| Dióxido de silicio (SiO2) | 5% |
| Cromo (Cr) | 97 ppm |
| Níquel (Ni) | 77 ppm |
| Plomo (Pb) | 60-760 ppm |
| Cadmio (Cd) | 5-10 ppm |
| Talio (Tl) | 0,2-0,3 ppm |

La mayor parte del neumático está compuesta por una mezcla de diferentes cauchos naturales, como el poliisopreno , o sintéticos, como el polibutadieno, el caucho de estireno-butadieno (SBR) y el caucho (halo)butílico, cuyas proporciones dependen de la aplicación. Estos cauchos, los cuales se muestran en la Figura 2.1, se encuentran principalmente en las bandas de rodadura (32,5 % en peso) y las paredes laterales (22 % en peso) (Bockstal et al., 2019).

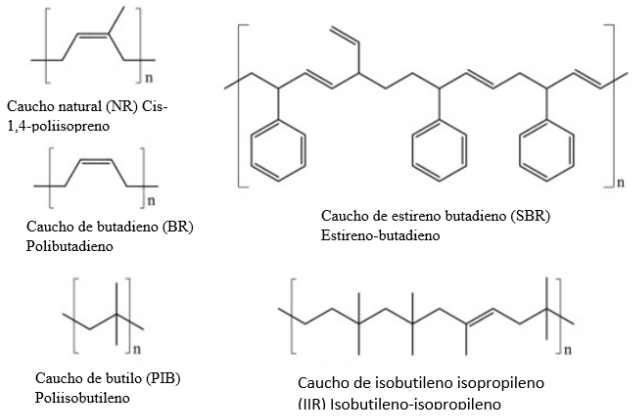



*Figura 2.1 Cauchos que podrían presentarse en la composición de algunos neumáticos, obtenida de (Bockstal et al., 2019). Fuente: (Bockstal et al., 2019)*

La característica distintiva del caucho sintético es su capacidad para deformarse a altas temperaturas. Sin embargo, a pesar de sus propiedades individuales, la mezcla de caucho natural y sintético no puede soportar condiciones extremas de funcionamiento. Por esta razón, es necesario agregar aditivos como cargas, elementos de acero y refuerzos textiles. El negro de humo es el material de refuerzo más utilizado, añadido en una proporción del 30%, ya que mejora la resistencia mecánica y proporciona a los neumáticos su color característico. Además, la incorporación de dióxido de silicio (SiO) aumenta la resistencia a las fisuras. Los plastificantes, que constituyen entre el 5% y el 7% del peso total del neumático, son otro componente crucial, ya que incrementan la durabilidad y la resistencia a la rodadura en diversas superficies (Saputra et al., 2021).

El negro de humo no solo mejora la resistencia mecánica del caucho, sino que también juega un papel fundamental en la protección contra los efectos dañinos de la radiación ultravioleta (UV) y la ozonólisis. Estas propiedades de protección ayudan a alargar la vida útil del neumático, previniendo la degradación prematura causada por la exposición a la luz solar y al ozono en la atmósfera. Esto es particularmente importante en condiciones de uso intensivo, como en vehículos comerciales y en regiones con climas cálidos. Por otro lado, el dióxido de silicio (SiO) no solo aumenta la resistencia a las fisuras, sino que también mejora la adherencia en superficies mojadas, lo cual es esencial para la seguridad en condiciones de lluvia. Los neumáticos con mayor contenido de sílice tienen un mejor rendimiento en cuanto a tracción en superficies húmedas, lo que reduce el riesgo de hidroplaneo y mejora la capacidad de frenado. Este tipo de compuesto es especialmente valorado en el desarrollo de neumáticos ecológicos, ya que además de mejorar el rendimiento, permite reducir la resistencia a la rodadura, lo que contribuye a una mayor eficiencia de combustible y menores emisiones de $CO_2$ (Saputra et al., 2021).

La presencia de azufre mejora las propiedades mecánicas de un neumático, aumentando su flexibilidad y resistencia a altas temperaturas (Figura 2.2). Por otro lado, una deficiencia de este elemento puede causar grietas y otros defectos. Para mantener la forma y rigidez del neumático, se añaden metales y textiles. Materiales como el nailon y el poliéster se usan como refuerzos textiles, mientras que el acero se emplea para formar uniones fuertes con el caucho.

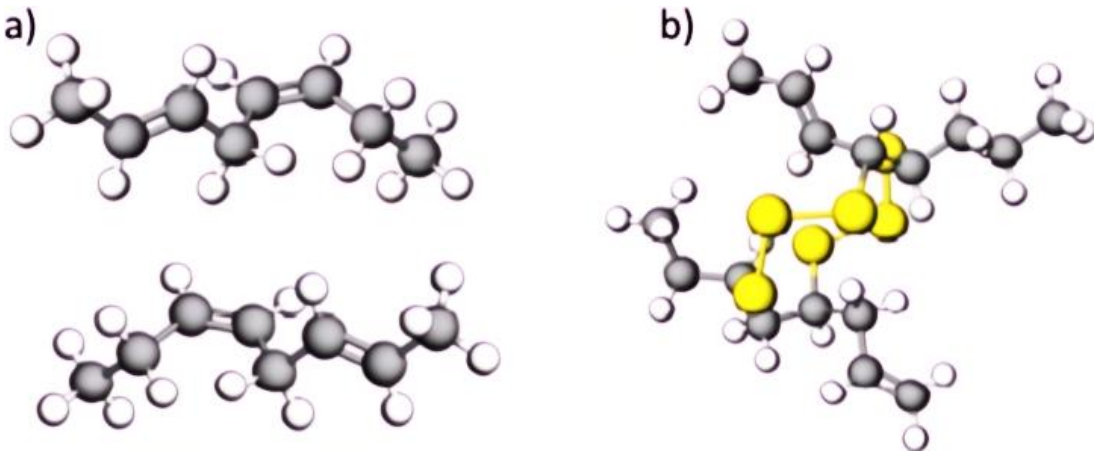



*Figura 2.2 Estructura química de (a) caucho natural y (b) caucho vulcanizado; las moléculas amarillas representan las cadenas cruzadas que han sido formadas por átomos de azufre. Fuente: (Rowhani & Rainey, 2016)*

## 2.2 Métodos de reciclaje de neumáticos y sus aplicaciones

El almacenamiento de residuos en vertederos es uno de los métodos menos recomendables para reciclar neumáticos desechados, ya que los componentes de los neumáticos tienen un impacto negativo en el medio ambiente. Las sustancias tóxicas se filtran tanto de los metales como de otros materiales presentes en los neumáticos, lo que lleva a la contaminación del agua y del suelo (Christensen, 2011). Para evitar esto, se emplean otros métodos de eliminación (Figura 2.3), que aprovechan la composición y las valiosas propiedades de los neumáticos desechados. Estos métodos se centran en la conversión efectiva de los neumáticos en materiales reutilizables o en energía.

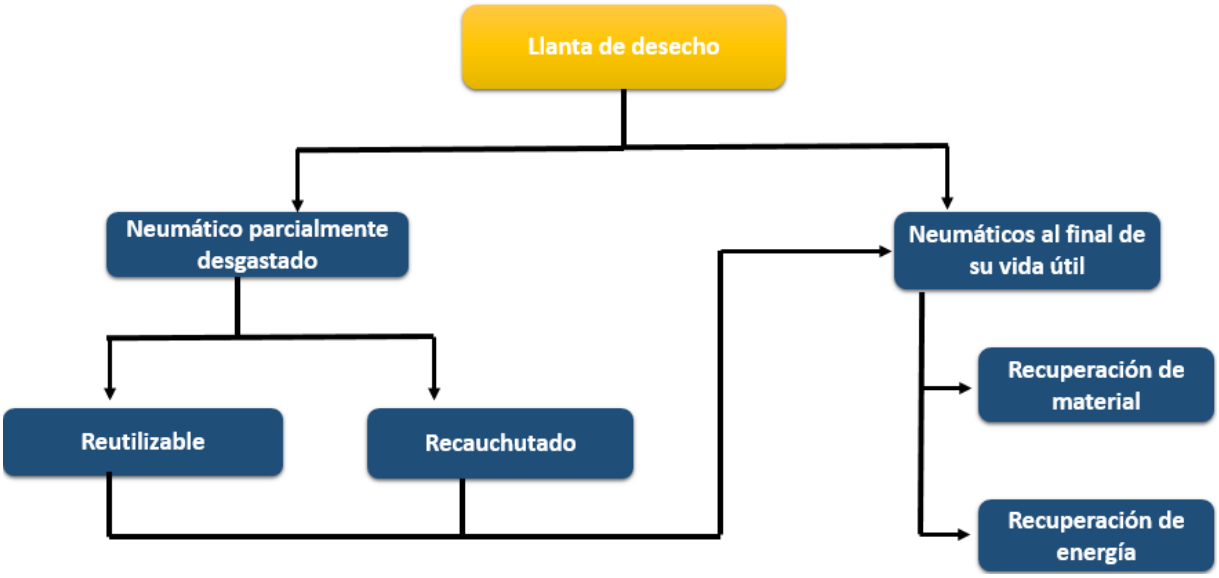



*Figura 2.3 Flujo de utilización de neumáticos de desecho. Creación propia C. Reyes, 2024*

### 2.2.1 Recauchutado

Una alternativa al desguace de neumáticos es extender su vida útil a través del recauchutado (Figura 2.4), que consiste en reemplazar la capa exterior del neumático mediante el proceso de vulcanización. Este proceso es similar a la fabricación de un neumático nuevo, pero requiere entre un 30% y un 50% menos de material, las pruebas de calidad han demostrado que los neumáticos recauchutados son tan seguros como los nuevos cuando se inspeccionan y renuevan adecuadamente (Sathiskumar & Karthikeyan, 2019).




*Figura 2.4 Recauchutado de neumáticos. Fuente: (Barrero 2021).*

### 2.2.2 Recuperación de energía

Las tecnologías de tratamiento térmico, como la pirólisis (Figura 2.5), la termólisis y la gasificación, son algunas de las soluciones emergentes para recuperar el valor de los neumáticos al final de su vida útil. Además, la industria cementera es uno de los mayores consumidores de neumáticos desechados, utilizándolos enteros o triturados como fuente de combustible en hornos de cemento que operan a temperaturas superiores a 1,200 °C. La ceniza y el cordón de acero se integran permanentemente en el clínker, siendo seguros para el medio ambiente. Los neumáticos desechados también se emplean como combustible para la producción de vapor, energía eléctrica, pulpa, papel, cal y acero (Amari et al., 1999).




*Figura 2.5 Pirolisis (Recuperación de energía). Fuente: (Tnu, 2023)*

### 2.2.3 Recuperación de materiales

Debido al alto contenido de caucho de los neumáticos, pueden reutilizarse para la producción de nuevos materiales poliméricos después de una fragmentación previa (Rowhani & Rainey, 2016). El proceso de triturar neumáticos desechados es complejo debido a su gran resistencia mecánica. El desafío principal es que es necesario retirar primero algunos componentes, como el acero y los textiles. No obstante, es importante mencionar que estos componentes también pueden ser reciclados o vendidos; los textiles, por ejemplo, pueden utilizarse como material de aislamiento o quemarse para producir energía mediante la combustión de fibra (Holst et al., 1998). Los métodos más utilizados para moler neumáticos de caucho son el mecánico, criogénico, húmedo y Berstoff (Rowhani & Rainey, 2016). Gracias a su gran capacidad para resistir condiciones ambientales adversas, las llantas desechadas, ya sea triturada, cortadas o enteras, tienen numerosas aplicaciones secundarias. Pueden ser utilizadas en la fabricación de suelas de zapatos, alfombras, muebles de exterior, alcantarillas y soportes para carreteras (Ruwona et al., 2019).

El caucho triturado de neumáticos es un material de desecho que se encuentra en abundancia, es relativamente estable y no se degrada (Figura 2.6).




*Figura 2.6 Recuperación de materiales de neumáticos desechados. Fuente: (Tnu, 2023)*

## 2.3 Polvo de llanta

Para usar las llantas como aditivo o modificante en una matriz polimérica se debe reducir el material a un tamaño de partícula entre 0.5 mm y 2 mm, según la aplicación (Rodríguez, 2016). El caucho triturado de neumáticos es un material de desecho que se encuentra en abundancia, es relativamente estable y no se degrada. A nivel molecular, la estructura del caucho de los neumáticos contiene partes polares y no polares, lo que le permite interactuar con moléculas de ambos tipos (Phasuphan et al., 2019). Con una modificación adecuada del caucho de los neumáticos, es posible eliminar contaminantes como aceites, compuestos farmacéuticos, colorantes, metales pesados, pesticidas y BTEX (Czarna-Juszkiewicz et al., 2023)

### 2.3.1 Métodos de obtención de obtención de polvo de llanta

Los métodos mecanoquímicos permiten conservar en mayor medida las valiosas propiedades de los elastómeros, debido a sus acciones térmicas, mecánicas y químicas, estos métodos permiten la destrucción parcial de la estructura tridimensional de los cauchos, y así obtener un producto que tiene propiedades plásticas. Las estructuras y propiedades originales de los elastómeros que forman parte de los desechos se conservan mejor cuando se utilizan métodos de procesamiento mecánico (Lapkovskis et al., 2020).

### 2.3.1.1 Trituración

El proceso primario de la reducción de tamaño de la llanta es la trituración, que consiste en romper mecánicamente la llanta, retirando el acero por medio de un separador magnético o a través de un mecanismo extrusor (Contreras , 2013).

Como se muestra en la figura 2.7, el proceso inicia con la trituradora preliminar que reduce el tamaño de las llantas a unos 2.5 cm aproximadamente. La siguiente etapa es el granulador que disminuye el tamaño de las partículas a 9.5 mm o menos. El acero se remueve magnéticamente y las fibras con una combinación de tamizadoras vibratorias y tamices. Las siguientes etapas están dedicadas a la reducción del tamaño de partícula hasta 0.85 mm o menos, según se requiera (Kaloush & Biligiri, 2011).

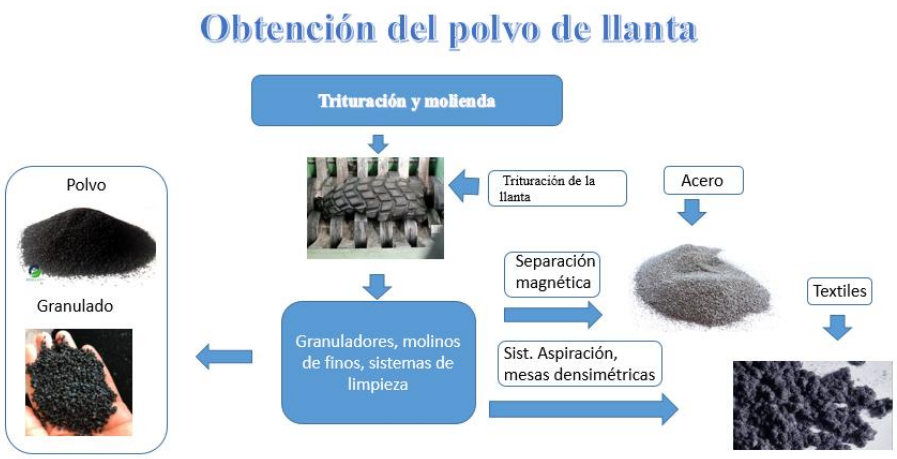



*Figura 2.7 Diagrama de proceso obtención del polvo de llanta. Creación propia C. Reyes, 2024*

### 2.3.2 Diferentes métodos de molienda

Los procesos secundarios para la reducción del tamaño de las partículas pueden clasificarse como proceso a temperatura ambiente, proceso criogénico y proceso de molienda vía húmeda. El proceso a temperatura ambiente tiene dos modalidades. La primera es por granulación y la segunda es molienda (Tabla 2.3). En ambos casos, el caucho se muele hasta tamaños controlados por tamices. El caucho obtenido por el proceso ambiental puede clasificarse según su tamaño como cortado, en astillas, en polvo y en migas (Ramírez, 2006).

*Tabla 2.3 Diferentes condiciones de molienda. Creación propia C. Reyes, 2024*

| | |
|---|---|
| **Molienda ambiental** | La molienda ambiental puede ser de dos tipos: mediante impacto de aire o chorro de agua. Los cauchos vulcanizados se introducen a través del espacio de paso de un molino de cizalla o de un molino de dos rodillos a temperatura ambiente (Dierkes, 2005). Este tipo de molienda no significa procesamiento a temperatura ambiente, ya que esta puede aumentar hasta 130 °C (Karger et al., 2013). |
| **Molienda criogénica** | Es la conversión de virutas elásticas de caucho en un material quebradizo exponiéndolas a gases líquidos. Generalmente, se utiliza nitrógeno líquido para enfriar el material gomoso hasta debajo de su región de transición vítrea. Posteriormente se realiza la trituración del material frágil congelado mediante la fuerza de impacto utilizando un molino de martillos |
| **Molienda vía húmeda** | En el proceso de craqueo por ozono, las partículas de neumáticos de desecho se exponen primero a una mayor concentración de ozono. El material se degrada durante esta exposición y posteriormente se requiere una trituración mecánica para su posterior procesamiento y obtención de un polvo fino. Sin embargo, el polvo fino obtenido muestra una baja actividad superficial debido a la oxidación por ozono (Dierkes, 2005). |

### 2.3.3 GTR (Polvo de llanta) en mezclas

La combinación de una matriz polimérica y GTR (superficie modificada) con elasticidad y resistencia al impacto podría mejorar las propiedades de la mezcla, como la resistencia a la tracción y el alargamiento a la rotura, dependiendo del nivel de interacción interfacial entre el GTR y la matriz (Shaker & Rodrigue, 2019). Incorporar tan solo un 10% en peso de GTR en matrices poliméricas, ya sean termoestables, termoplásticas o de caucho, representa un significativo aprovechamiento de neumáticos desechados como sustituto parcial de los polímeros vírgenes (Karger et al., 2013). Sin embargo, la cantidad de GTR en materiales compuestos está limitada debido a las malas interacciones entre el GTR y el polímero, lo que provoca una disminución en las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas (Kakroodi & Rodrigue, 2013). Por esta razón, se han llevado a cabo diversos estudios para descubrir técnicas adecuadas que permitan incorporar mayores cantidades de GTR (más del 50% en peso) en matrices poliméricas, con el fin de reducir costos y el uso de materiales nuevos o vírgenes. Se han propuesto diferentes enfoques, como la

compatibilización, la modificación de la superficie y la regeneración, para enfrentar este desafío y mejorar la adhesión interfacial entre los componentes(Fazli & Rodrigue, 2020b). Se pueden emplear copolímeros con segmentos que se asemejan a los componentes de la mezcla para compatibilizar mezclas que contienen GTR, actuando como enlaces (físicos/químicos) entre polímeros inmiscibles y mejorando así su compatibilidad (Ramarad et al., 2015).

Por ejemplo, el anhídrido maleico injertado en polietileno (PE-g-MA), conocido como un compatibilizador eficaz, se emplea para reducir la tensión interfacial y estabilizar la morfología de las mezclas de poliolefinas que contienen GTR (Kakroodi & Rodrigue, 2013).

La modificación de la superficie conduce a la generación de grupos peroxi, hidroperoxi, hidroxilo y carbonilo en la superficie del GTR para promover la interacción con polímeros polares o compatibilizadores reactivos. En este método, agentes oxidantes, como el permanganato de potasio ($KMnO_4$) (Sonnier et al., 2007), ácido nítrico ($HNO_3$) y peróxido de hidrógeno ($H_2O_2$) (Yehia et al., 2004) y ácido sulfúrico ($H_2 SO_4$) (Colom et al., 2006), así como la radiación de energía y ondas ultrasónicas (Guigard et al., 2014) se han utilizado para el tratamiento de superficies GTR.

### 2.3.4 Modificación del GTR

El principal problema al introducir GTR reticulado o parcialmente regenerado en diversas matrices poliméricas es la adhesión y unión interfacial insuficiente con la fase continua, especialmente cuando se usa en altas concentraciones (superiores al 50% en peso). Para obtener una buena resistencia mecánica y estabilidad a largo plazo, es necesario resolver este problema y asegurar una adecuada adhesión y transferencia de tensión interfacial (Ramarad et al., 2015).

Por lo tanto, la modificación de la superficie del GTR proporciona sitios de interacción específicos entre las fases, lo que mejora la adhesión interfacial (reduciendo la tensión interfacial), evita la aglomeración de partículas y estabiliza la morfología durante el procesamiento(Fan & Lu, 2011). En consecuencia, una mejor compatibilidad en las mezclas da lugar a propiedades mecánicas superiores debido a una interface fuerte y una transferencia de tensión interfacial suave.

Los enfoques de compatibilización se pueden clasificar en métodos físicos y químicos, donde la compatibilización química se divide en métodos reactivos y no reactivos. La compatibilización física se realiza para mejorar la actividad y rugosidad de la superficie mediante la aplicación de fuerzas externas como el corte mecánico o termomecánico, microondas, radiación γ, ondas ultrasónicas, luz ultravioleta (UV), ozono, plasma y tratamiento de descarga de corona para crear una interface gruesa y mejorar la humectación. Por otro lado, los métodos de compatibilización reactiva implican la adición de moléculas reactivas durante el mezclado para formar una interface químicamente unida, mientras que los métodos no

reactivos se basan en la introducción de copolímeros (bloque o injerto) y/o nanopartículas (NP) para mejorar la compatibilidad de la mezcla. Cabe mencionar que la regeneración del caucho también puede tener un efecto compatibilizante debido al posible entrelazamiento molecular con resinas termoplásticas y cauchos curables (Fazli & Rodrigue, 2020a).

### 2.3.5 Solventes

En términos químicos, los disolventes, que generalmente se encuentran en estado líquido, se utilizan para extraer o disolver otros materiales sin alterarlos químicamente. Según su polaridad, los disolventes se clasifican en polares y no polares. Los disolventes polares se utilizan para disolver únicamente sustancias polares. Algunos ejemplos de disolventes polares son el agua, acetona, acetonitrilo, dimetilformamida (DMF), dimetilsulfóxido (DMSO), etanol, isopropanol y metanol. Por otro lado, los disolventes no polares se emplean para disolver sustancias apolares estos disolventes son capaces de disolver sustancias no hidrosolubles y, debido a sus propiedades disolventes, tienen múltiples aplicaciones en diversas tecnologías industriales y en laboratorios de investigación.

El empleo de diversos disolventes como hexano, fluidos supercríticos o aceites es efectivo para mejorar la transferencia de calor, además de expandir el caucho para generar tensiones internas, facilitando la ruptura de los enlaces cruzados(Wang et al., 2013).

Cuando el caucho del neumático se somete a condiciones de licuefacción, la porción orgánica se convierte en aceite para neumáticos y queda negro de humo como residuo sin reaccionar. Otros autores se han preocupado por la producción de carbón activo a partir de la pirólisis de neumáticos de desecho (Cunliffe & Williams, 1998). Se sabe que el tipo de disolvente utilizado en la licuefacción del carbón desempeña un papel clave en la conversión del carbón. El disolvente actúa como medio para ayudar en el transporte de hidrógeno, como medio de transferencia de calor, como reactivo adicional junto con el carbón, como medio de disolución del carbón y como medio para transportar los productos de licuefacción del carbón fuera de la matriz del carbón.

Los neumáticos usados de automóviles han sido sometidos a procesos de extracción supercríticos utilizando n-pentano, tolueno, nitrógeno y agua (Joung et al., 2001). Funazukuri et al.(Joung et al., 2001) reportó que a 380 °C y 5.2 MPa, la extracción supercrítica usando tolueno como disolvente convirtió el 57 % del neumático en aceites y el 40 % del neumático quedó como residuo sólido. También informaron que el agua supercrítica era casi tan eficaz como el tolueno supercrítico para la licuefacción de neumáticos.

Park y Gloyna (Park & Gloyna, 1997) utilizaron agua supercrítica para licuar neumáticos de desecho y las variables cualitativas fueron la composición de la fase gaseosa inicial y la elección del catalizador. Reportando que la conversión máxima y el rendimiento de aceite fueron del 89% y 68%, respectivamente.

Kershaw (Kershaw, 1998) ha extraído neumáticos de desecho con etanol supercrítico, acetona, tolueno y n-butanol. Señalando que el rendimiento de la extracción era significativamente menor cuando se usaba etanol supercrítico a temperaturas más bajas. Kershaw informó que los oligómeros de isopreno eran componentes principales de los aceites para neumáticos extraídos.

Joung y colaboradores investigaron la recuperación de petróleo de neumáticos de desecho mediante extracción supercrítica a baja temperatura con tolueno y ciclohexano. Estudiaron las características de la descomposición mediante análisis termogravimétrico (TGA). Los resultados demostraron que la temperatura era la variable de proceso más importante en comparación con la presión, para la disolución completa de los materiales de los neumáticos.

Sultan y colaboradores (Giray & Sönmez, 2004) estudiaron la extracción supercrítica de llantas de desecho y el coprocesamiento de carbón con aceite de llantas. En la primera etapa, se sometieron neumáticos a una extracción a 400°C utilizando diversos disolventes. Se evaluaron los efectos de los hidrocarburos y los disolventes polares empleados en condiciones de extracción supercrítica sobre la conversión y el producto petrolífero del neumático, observando que todo el material orgánico volátil del neumático de desecho se transformó en productos líquidos o gaseosos. En la segunda etapa, se extrajeron muestras de carbón y aceite de neumáticos a través de un método supercrítico (SCETO) con diferentes disolventes, utilizando varias proporciones de aceite de neumáticos/carbón. En general, el uso de aceite de neumáticos mejoró la conversión del carbón, además de que el rendimiento de petróleo fue superior al del carbón solo. Los SCETO se caracterizaron mediante técnicas analíticas espectroscópicas (FTIR) y cromatográficas (GC-MS). Los resultados de GC-MS y FTIR indicaron que los aceites están compuestos principalmente por especies alquilaromáticas y que contienen una cantidad significativa de compuestos fenólicos sustituidos con alquilo.

El uso de acetona como método de modificación del polvo de llanta presenta varias ventajas clave para lograr una mejor adhesión interfacial con otros polímeros. En primer lugar, la acetona es un solvente altamente eficaz que puede disolver parcialmente el caucho, además la acetona actúa como un agente de limpieza, eliminando impurezas y residuos superficiales del polvo de llanta, permite la eliminación eficiente de impurezas y contaminantes superficiales presentes en el polvo de llanta, como aceites residuales, agentes de vulcanización no reaccionados y otros compuestos orgánicos volátiles, lo que resulta en una superficie más limpia y reactiva para la adhesión (Kim et al., 2000). La eliminación de estos contaminantes es crucial porque pueden actuar como barreras físicas y químicas que inhiben la interacción entre el caucho reciclado y la matriz polimérica, afectando negativamente la adhesión. Además, el proceso de limpieza puede aumentar la rugosidad de la superficie del polvo de llanta al eliminar capas superficiales de materiales no

deseados, lo que proporciona más sitios de anclaje para las cadenas poliméricas y mejora la adhesión mecánica. La limpieza exhaustiva también puede exponer grupos funcionales reactivos en la superficie del caucho, facilitando la formación de enlaces químicos más fuertes con los polímeros.

Específicamente, la norma ASTM D297 utiliza la acetona para remover componentes de productos de caucho vulcanizados, tales como aceites minerales, ceras, ácidos grasos, aceleradores orgánicos o sus productos de descomposición, resinas de caucho, azufre libre, plastificantes y antioxidantes solubles en acetona (ASTM–D-297, 1993).

### 2.3.6 Métodos de desvulcanización del caucho

La desvulcanización del caucho implica dos etapas principales: la molienda del caucho para reducir su tamaño y la ruptura de los enlaces químicos (principalmente enlaces de azufre) mediante varios métodos. La compatibilidad se ve afectada por las reticulaciones de azufre, lo que conduce a una interfaz débil y al deterioro de las propiedades del producto final, por lo que surge la necesidad de la desvulcanización. La desvulcanización se puede lograr utilizando varios medios, como métodos químicos, ultrasónicos, de microondas, biológicos y otros (Adhikari et al., 2018).

#### 2.3.6.1 Químico

La desulfuración química del caucho se basa en el uso de diversos productos capaces de romper los enlaces de azufre presentes en su estructura. Entre estos se encuentran compuestos como el disulfuro de dialilo orgánico, el disulfuro de difenilo (Jana et al., 2007), la fenilhidrazina inorgánica y el cloruro ferroso (Kawabata et al., 1981), los cuales actúan sobre las uniones de azufre favoreciendo la degradación controlada del material. Asimismo, para facilitar la acción de estos agentes se emplean solventes que permiten hinchar el caucho y mejorar la difusión de los reactivos dentro de su matriz. Tradicionalmente, se han utilizado disolventes como el tolueno y el benceno; sin embargo, estos presentan inconvenientes ambientales y elevados costos de recuperación. Por ello, como alternativa más sostenible y segura, se ha propuesto el uso de dióxido de carbono supercrítico ($CO_2$), ya que este puede hinchar el caucho y distribuir los productos químicos sin generar toxicidad, además de ser adecuado para aplicaciones a escala industrial (Mangili et al., 2014).

#### 2.3.6.2 Desvulcanización ultrasónica

El proceso de desulfuración mediante vibración ultrasónica se basa en la aplicación de ondas de alta frecuencia que permiten romper selectivamente los enlaces S–S y C–S presentes en el caucho, sin afectar de manera significativa los enlaces C–C de su estructura principal (Isayev et al., 2014). Esta técnica ofrece

diversas ventajas, entre las que destacan la mínima degradación de las propiedades mecánicas del material, la posibilidad de operar de forma continua, la ausencia de productos químicos y su carácter ambientalmente amigable. Además, el éxito del proceso depende de varios parámetros clave, como la temperatura de operación, la amplitud de las ondas ultrasónicas y la presión ejercida por el troquel en la extrusora de doble tornillo, los cuales deben controlarse cuidadosamente para optimizar la eficiencia del tratamiento.

#### 2.3.6.3 Método de desvulcanización por microondas

El proceso de desulfuración por microondas emplea energía electromagnética para romper los enlaces S–S y C–S presentes en el caucho, lo que permite restaurar su capacidad de conformación sin afectar de manera significativa la estructura principal del polímero (Hirayama & Saron, 2012; Zanchet et al., 2012). Esta técnica destaca por su rapidez y por permitir un procesamiento continuo, siendo especialmente adecuada para cauchos que contienen grupos polares; además, en el caso de cauchos no polares, puede incorporarse negro de humo para mejorar la absorción de la energía de microondas. Las condiciones de operación suelen situarse entre temperaturas de 260 a 350 °C y frecuencias de 300 MHz a 300 GHz, las cuales favorecen la ruptura de los enlaces de azufre sin llegar a provocar la despolimerización del caucho. Esto se debe a que la energía suministrada se dirige principalmente hacia los enlaces más débiles (S–S y C–S), evitando la ruptura de las cadenas principales de carbono y preservando así la integridad del material base.

#### 2.3.6.4 Método de desvulcanización biológica

El proceso de desulfuración biológica utiliza bacterias y hongos capaces de romper los enlaces de azufre presentes en el caucho, constituyendo un método ambientalmente amigable y sostenible (Yikmis & Steinbüchel, 2012). Entre los microorganismos más utilizados se encuentran bacterias como *Actinomadura* y *Actinomyces*, así como hongos del género *Penicillium* y *Aspergillus*, los cuales actúan sobre los enlaces de azufre mediante mecanismos enzimáticos específicos (Yikmis & Steinbüchel, 2012). Este procedimiento se lleva a cabo en un biorreactor con temperatura controlada, donde el tiempo de contacto entre el microorganismo y el caucho depende de la especie empleada y de las condiciones de cultivo. No obstante, uno de los principales desafíos del método es la necesidad de eliminar previamente los aditivos presentes en el caucho, ya que estos pueden inhibir la actividad microbiana y reducir la eficacia del proceso de desulfuración.

### 2.3.7 Clasificación del caucho en polvo

El tamaño de partícula especificado de diferentes clases de caucho y sus posibles aplicaciones se proporciona en la Tabla 2.4.

*Tabla 2.4 Clasificación, fabricación y utilización del caucho en polvo. Fuente: (Fang et al., 2001)*

| Clasificación | Tamaño de partícula | | Instalaciones | Solicitud |
|---|---|---|---|---|
| | **µm** | **Malla** | | |
| GTR grueso | 1400-500 | 12-30 | Molino, laminador, molino triturador rotativo | Materia prima del caucho regenerado degradado. |
| GTR pequeño | 500-300 | 30-47 | Laminador, molino triturador rotativo | Materia prima del caucho regenerado lubricado. |
| GTR fino | 300-75 | 47-200 | Molino criogénico, molino triturador de congelación | Productos de moldeo y extrusión, tapetes de caucho y asfalto modificado para pavimentar |
| GTR ultrafino | Menos de 75 | Arriba de 200 | Molino coloidal rotatorio | Utilizado en renovación de neumáticos. |

La utilización del polvo de llanta como del almidón en el presente trabajo está relacionada con la diminución del costo final de los materiales obtenidos, ya que dichos materiales estarán actuando como una carga, estos sin disminuir significativamente las propiedades físicas y mecánicas de la matriz de polimérica de PBAT, y que una de las principales limitaciones en la aplicación de este tipo de polímeros está relacionada con su alto costo.

## 2.4 Almidón

Los alimentos ricos en almidón siempre han sido una parte importante de la dieta humana. No debería sorprender, entonces, que otras aplicaciones para este abundante material natural se desarrollaran tempranamente en la historia del hombre. Por ejemplo, hay pruebas de que ya en el año 4000 a.C. se utilizaba almidón como recubrimiento para el papiro (Whistler et al., 2012). El almidón es un polisacárido de reserva energética de los vegetales y se localiza principalmente en cereales, raíces, tubérculos, frutas y semillas. Ocupa el segundo lugar de abundancia en la naturaleza después de la celulosa, almacenándose en los amiloplastos de las células vegetales (Marín, 2016).

### 2.4.1 Composición

El almidón está compuesto fundamentalmente por dos polímeros de glucosa: amilosa y amilopectina, además de una fracción minoritaria (de 1% a 2%) de formación no glucosídica. La mayoría de los almidones en su estructura glucosídica están conformados por un 20 % de amilosa y 80 % de amilopectina (Marín, 2016).

La amilopectina que se muestra en la Figura 2.8, está formada por α-D-glucosa, concatenada fundamentalmente por enlaces α-(1→4). Está mucho más ramificada que la amilosa, con un 4-5 % de enlaces α-(1→6). El peso molecular es del orden de $10^8$ Da (Dalton), con aproximadamente 600000 restos de glucosa y se encuentra ramificada al azar (Marín, 2016).

La amilosa (Figura 2.9) se compone principalmente de cadenas de restos de α-D-glucopiranosilo unidas por enlaces α-(1→4). Aunque se admite que se trata de un polímero lineal, existe una pequeña proporción (de 0.3 a 0.5) de ramificaciones por enlaces α- (1→6) (Thomas & Atwell, 1999). El peso molecular varía entre $1x10^5$ y $1x10^6$ Da y puede contener entre 500 y 6000 unidades de glucosa. La naturaleza lineal y de gran longitud le confieren a la amilosa algunas propiedades únicas, como por ejemplo, su capacidad para formar complejos con yodo, alcoholes o ácidos orgánicos y su tendencia a asociarse consigo misma, precipitando de la solución(Marín, 2016).

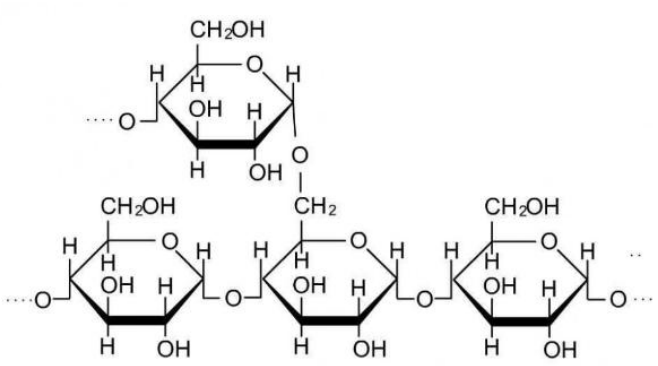


*Figura 2.8 Estructura química de la amilopectina. Fuente: (Khaikhum 2020)*

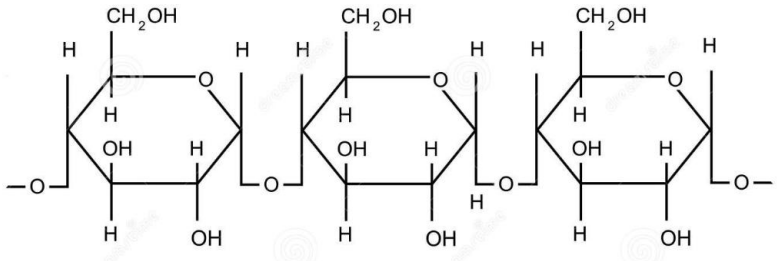


*Figura 2.9 Estructura química de la amilosa. Fuente: (Khaikhum(2020)*

### 2.4.2 Estructura del gránulo del almidón

La imagen muestra una representación esquemática de la estructura interna de un gránulo de almidón, destacando la organización jerárquica de las moléculas de glucosa que lo conforman. En la parte izquierda se observan laminillas o capas organizadas de cadenas de glucanos (amilosa y amilopectina) que se disponen en regiones cristalinas y amorfas alternadas. Estas capas forman los anillos concéntricos visibles en el gránulo de almidón bajo microscopía, los cuales corresponden a zonas de diferente orden molecular.

Las flechas negras indican la dirección en que las cadenas de polisacáridos se ordenan dentro de la matriz. Las zonas cristalinas son aquellas donde las cadenas de amilopectina se alinean en forma paralela y ordenada, estabilizadas por puentes de hidrógeno, mientras que las zonas amorfas están formadas por segmentos más desordenados, ricos en ramificaciones y con mayor contenido de amilosa. En la parte derecha, el recuadro ampliado muestra una vista molecular de las cadenas de amilopectina, donde se distinguen las ramificaciones de glucosa (representadas en diferentes colores), ilustrando cómo las moléculas se agrupan en una estructura semicristalina.

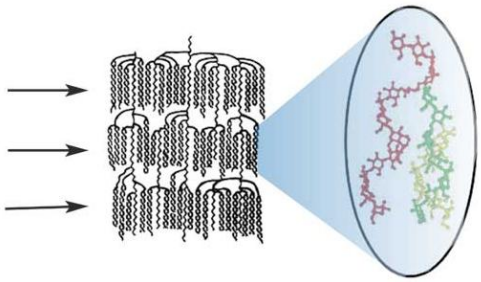


*Figura 2.10 Estructura del granulo de almidón. Fuente: (Science in School, 2010).*

### 2.4.3 Propiedades fisicoquímicas

Compuesto principalmente por dos polisacáridos, la amilosa (20-30%) y la amilopectina (70-80%), se caracteriza por una estructura granular que varía en tamaño desde 2 hasta 30 micrones, con formas poligonales o esféricas. La amilosa, una cadena lineal de glucosa, contribuye a la formación de películas y geles, mientras que la amilopectina, altamente ramificada, afecta la viscosidad y la textura de las pastas de almidón.

### 2.4.4 Gelatinización del almidón

El almidón de maíz nativo gelatiniza, típicamente, en un rango de temperatura entre 60 y 70°C, un proceso que se puede analizar mediante técnicas como la calorimetría diferencial de barrido (DSC). Durante la gelatinización, los gránulos de almidón absorben agua y se hinchan, lo que lleva a la disrupción de las estructuras cristalinas internas y la pérdida de la birrefringencia. Este proceso aumenta la viscosidad de la mezcla, formando una pasta espesa. La gelatinización implica una absorción significativa de energía, con valores de entalpía (ΔH) que varían entre 10 y 20 J/g, dependiendo de factores como la fuente del almidón y su contenido de humedad. La capacidad de hinchamiento, medida como el volumen que pueden alcanzar los gránulos de almidón tras la absorción de agua, es crucial para aplicaciones culinarias e industriales, afectando directamente la textura y estabilidad de los productos finales.(Sandhu & Singh, 2007).

### 2.4.5 Retrogradación del almidón

Después de la gelatinización, cuando la pasta de almidón se enfría, se produce la retrogradación, un fenómeno en el que las moléculas de amilosa y amilopectina se reorganizan, formando estructuras más ordenadas y cristalinas. Este proceso puede llevar a la sinéresis (expulsión de agua) y al endurecimiento del gel, lo que afecta la calidad y la vida útil de productos alimenticios como salsas y pudines. La retrogradación es influenciada por factores como la concentración de amilosa, la presencia de otros ingredientes y las condiciones de almacenamiento. Este fenómeno puede comenzar a temperaturas tan bajas como 4°C y es notable dentro de las primeras 24 horas después de la gelatinización, aunque sigue desarrollándose durante días o semanas. La retrogradación se evalúa comúnmente mediante técnicas como la calorimetría diferencial de barrido (DSC), donde se detecta una exoterma característica en el rango de 40-60°C debido a la recristalización del almidón (Sandhu & Singh, 2007).

### 2.4.6 Cristalinidad del almidón

La cristalinidad del almidón de maíz es una característica fundamental que influye en sus propiedades fisicoquímicas y en su comportamiento durante el procesamiento y almacenamiento. Este almidón exhibe una estructura semi-cristalina, compuesta por regiones amorfas y cristalinas, que se organizan en patrones helicoidales. Los patrones cristalinos del almidón de maíz se clasifican principalmente en tipo A y tipo B, con el tipo A siendo predominante en cereales como el maíz. El tipo A se caracteriza por tener una densidad de empaquetamiento más alta y una mayor estabilidad térmica comparada con el tipo B, común en tubérculos y almidones modificados. La cristalinidad del almidón de maíz es un factor determinante en procesos como la gelatinización y la retrogradación; durante la gelatinización, las regiones cristalinas se rompen, permitiendo la absorción de agua y el hinchamiento de los gránulos. La retrogradación, por otro

lado, implica la re-formación de estas estructuras cristalinas, afectando la textura y la estabilidad del producto final (Liu et al., 2015). El grado de cristalinidad puede ser evaluado mediante técnicas como la difracción de rayos X, que revela el porcentaje de la estructura que es cristalina versus amorfa. Generalmente, el almidón de maíz tiene un grado de cristalinidad que varía entre el 20% y el 40%, aunque este valor puede cambiar dependiendo de factores como el origen del maíz y las condiciones de procesamiento. La comprensión de la cristalinidad del almidón es crucial para optimizar su uso en la industria alimentaria, ya que influye en la digestibilidad, la textura y la respuesta al calor de los productos que contienen almidón.

## 2.5 PBAT

Existe un interés creciente en diseñar nuevos polímeros biodegradables para abordar los problemas relacionados con los recursos provenientes de fuentes fósiles y la contaminación ambiental asociados a los plásticos convencionales. Un tipo de estos nuevos polímeros, los copoliésteres alifáticos-aromáticos, han sido ampliamente investigados y han avanzado rápidamente en los últimos años. Estos copoliésteres combinan la excelente biodegradabilidad de los poliésteres alifáticos con las destacadas propiedades de los poliésteres aromáticos, ofreciendo una solución prometedora para la sustitución de plásticos convencionales.

El poli (Butilén Adipato-co-Tereftalato) (PBAT) es un poliéster alifático aromático que está clasificado como biodegradable. Es un polímero derivado del petróleo con propiedades mecánicas similares a las del polietileno. El 1,4-butanodiol junto con el monómero de ácido tereftálico (BT) es responsables del dominio rígido, mientras que el 1,4-butanodiol junto con el monómero de ácido adípico (BA) es responsables de la flexibilidad del polímero.

### 2.5.1 Síntesis del PBAT

Los poliésteres en general se sintetizan mediante policondensación a partir de combinaciones de dioles y ácidos dicarboxílicos (Okada, 2002). PBAT, específicamente, se puede producir mediante una reacción de policondensación de butanodiol (BDO), ácido tereftálico (PAT) y ácido adípico (AA) utilizando tecnología y equipos de fabricación de poliéster convencionales, como se describe en la figura 2.11.

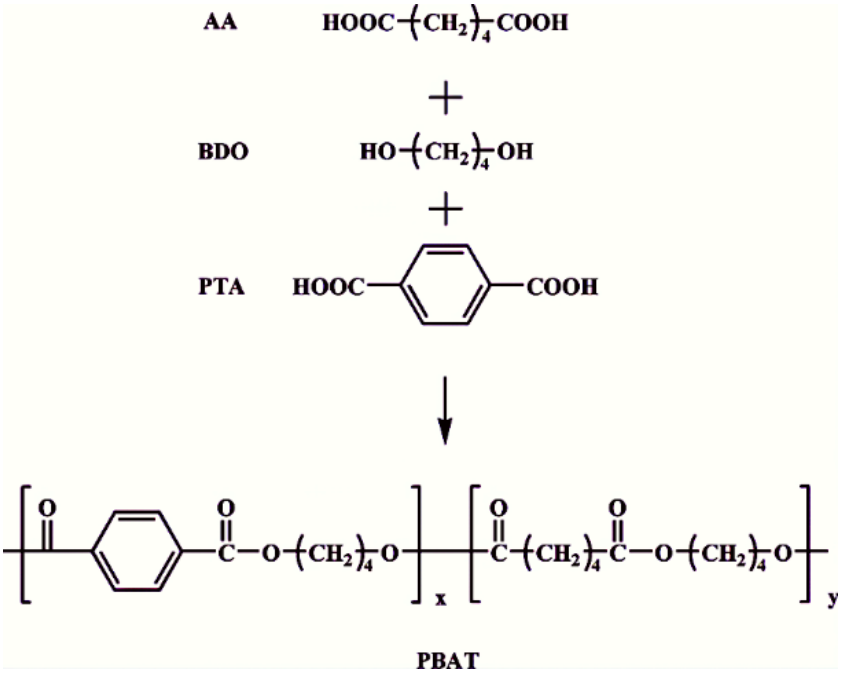



*Figura 2.11 Síntesis del PBAT. Fuente: (Okada, 2011)*

### 2.5.2 Propiedades del PBAT

A continuación, se describen a detalle las propiedades del PBAT, un polímero biodegradable que ha ganado relevancia en el desarrollo de materiales sostenibles debido a su combinación de flexibilidad, resistencia mecánica y capacidad de degradación en ambientes adecuados.

#### 2.5.2.1 Biodegradabilidad

Dado que se descubrió que los poliésteres aromáticos, como el PET o el PBT, eran resistentes a la hidrólisis en condiciones suaves y al ataque significativo de microorganismos, se realizaron numerosos intentos para aumentar su susceptibilidad hidrolítica (Heidary & Gordon, 1994) y degradabilidad biológica (Tokiwa & Suzuki, 1981) mediante la introducción de componentes alifáticos en las cadenas de poliéster aromático. En 1995, Witt et al., informaron por primera vez que los copoliésteres PBAT se degradaban en una prueba de simulación de composta a 60 °C hasta un contenido de PTA de aproximadamente el 50% en moles (Witt et al., 1995). La disminución significativa de las masas molares promedio en peso de los materiales residuales, en comparación con las masas molares iniciales, indicó que en los copoliésteres ocurre tanto la descomposición biológica en la superficie como una considerable hidrólisis química.

Un año después, Witt et al., publicaron nuevamente datos donde mostraron que la tasa de biodegradación del PBAT depende del contenido de PTA en el polímero (Witt et al., 1996). Aunque la tasa de degradación biológica disminuye continuamente al aumentar la fracción de PTA en el copolímero, con un contenido de

aproximadamente 50% en moles de PTA, se estima que la tasa de degradación sigue siendo suficiente para que estos materiales sean adecuados para la degradación en un proceso de compostaje. También se investigó el efecto de las secuencias aromáticas en la biodegradación del PBAT (Müller et al., 2001). Los resultados demuestran que incluso los oligómeros aromáticos más largos pueden ser biodegradables en compost a temperaturas elevadas debido a la hidrólisis química, mientras que los oligómeros que contienen uno o dos tereftalatos se degradan fácil y rápidamente.

En experimentos artificiales de alta acumulación de degradación en PBAT, se lograron determinar e identificar diversos oligómeros alifáticos y aromáticos. Sin embargo, al final de los experimentos, solo se observaron los monómeros PTA, AA y BDO. Con los métodos analíticos empleados, no se detectaron otros compuestos éster que no pudieran asociarse con los componentes del medio. Al inocular el medio que contenía los productos de degradación con un cultivo mixto de compost, se demostró que todos los monómeros fueron fácilmente metabolizados por la población microbiana del compost (Witt et al., 2001).

La institución de pruebas internacional autorizada Organic Waste System (OWS) llevó a cabo un programa de pruebas de compostaje en PBAT de acuerdo con las normas EN 13432 y ASTM D6400. Algunos resultados de estas pruebas se muestran en la Fig. 2.12. Como conclusión general, se puede afirmar que el material PBAT cumple con los criterios de evaluación de características del material, biodegradación, desintegración y calidad del compost, detallados en estas normas. Por lo tanto, se concluye que el PBAT es totalmente compostable. Además, el PBAT ha obtenido certificados de compostaje autorizados de instituciones como TUV (Bélgica), DIN-CERTCO (Alemania) y BPI (EE.UU.)(Jian et al., 2020).

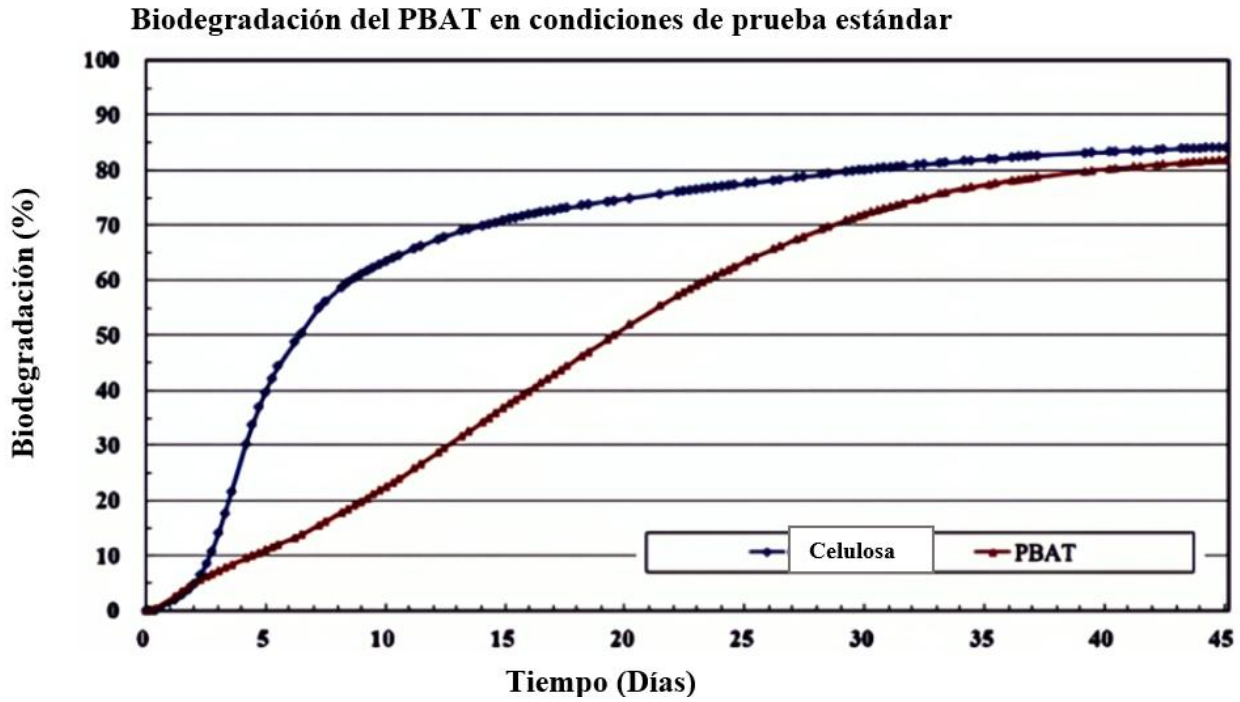



*Figura 2.12 Pruebas PBAT. Fuente: (Jian et al., 2020).*

### 2.5.2.2 Propiedades mecánicas

El PBAT no solo muestra una buena biodegradabilidad debido a la unidad alifática en su cadena molecular, sino también excelentes propiedades mecánicas gracias a la unidad aromática en la cadena molecular. En comparación con la mayoría de los poliésteres biodegradables, como el ácido poliláctico (PLA) y el succinato de polibutileno (PBS), las propiedades mecánicas del PBAT son más flexibles y se asemejan a las del polietileno de baja densidad (LDPE)(Bordes et al., 2009). Estas propiedades mecánicas hacen del PBAT un material biodegradable muy prometedor para una amplia gama de aplicaciones potenciales.

Las propiedades mecánicas del PBAT están influenciadas por la composición de los monómeros y el peso molecular. Según las investigaciones realizadas por Lee et al. y Herrera et al., el módulo de Young aumenta con el contenido en unidades de tereftalato, mientras que el alargamiento de rotura disminuye(Lee et al., 1999). Además, la resistencia a la tracción se incrementa mientras que el alargamiento de rotura disminuye con el aumento del peso molecular (Khan et al., 2010). Basándose en estos hallazgos, se puede adaptar las propiedades mecánicas del PBAT ajustando las variables del proceso, como la presión y la temperatura del reactor, ya que estas variables afectan el peso molecular del PBAT.

Los valores típicos respaldados por la empresa KINGFA para las propiedades mecánicas del PBAT se enumeran en la Tabla 2.5. En comparación con el polietileno de baja densidad (LDPE), el PBAT tiene propiedades mecánicas similares. La resistencia a la tracción del PBAT es de 21 MPa y el alargamiento de rotura es del 670%. Además, la resistencia a la flexión es de 7.5 MPa y el módulo de flexión es de 126 MPa. El índice de flujo de fusión a 190 °C con un peso de 2.16 kg es de aproximadamente 4, lo que lo hace muy adecuado para aplicaciones de películas sopladas (Jian et al., 2020).

*Tabla 2.5 Propiedades mecánicas del PBAT. Creación propia C. Reyes, 2024*

| Propiedades | Método de prueba | Condición de prueba | Unidades | PBAT |
|---|---|---|---|---|
| **Propiedades mecánicas** | | | | |
| **Resistencia a la tracción** | Norma ASTM D638 | 50 mm/min | MPa | 21 |
| **Elongación de rotura** | Norma ASTM D638 | 50 mm/min | % | 670 |
| **Fuerza flexible** | Norma ASTM D790 | 2mm/minuto | MPa | 7.5 |
| **Módulo de flexión** | Norma ASTM D790 | 2mm/minuto | MPa | 126 |
| **Propiedades térmicas** | | | | |
| **Punto de fusión** | DSC | 10°C/minuto | °C | 115–125 |
| **Punto de cristalización** | DSC | 10°C/minuto | °C | 60 |
| **5% de temperatura para bajar de peso** | TG | 20°C/minuto | °C | 350 |
| **Temperatura de distorsión del calor.** | Norma ASTM D648 | 1.82 MPa, 6.4 mm | °C | 55 |

### 2.5.2.3 Comportamientos de cristalización

El PBAT tiene una estructura cristalina similar a PBT bien desarrollada a pesar de su aleatoriedad y proporción de composición ideales. Su temperatura de fusión es más de 110 °C inferior a la del PBT. Con base en los análisis cuantitativos sobre el espaciado de la red, la cristalinidad y la fracción de secuencias de BT cristalizables en PBAT, se aclaró que la estructura cristalina de PBAT se formaría mediante cristalización mixta de unidades de BT y BA, donde las unidades de BA se incorporaron a la red de BT. Se

descubrió que esta estructura de cristal mixto sufre un cristal reversible similar al PBT desde la transición tras la aplicación y eliminación de tensión. Sin embargo, debido a la propiedad elástica de PBAT, su transición de forma cristalina se produjo en una región de mayor tensión en comparación con la transición α a β de PBT (Gan et al., 2004).

Los comportamientos de cristalización y fusión de PBAT se investigaron mediante calorímetro diferencial de barrido (DSC) con una velocidad de enfriamiento y calentamiento de 10 °C/min. Y la estabilidad térmica del PBAT también se investigó mediante análisis termogravimétrico (TGA) con una velocidad de calentamiento de 20 °C/min en condiciones de nitrógeno ($N_2$). Los datos térmicos también se resumen en la Tabla 2.5 Se puede ver en los datos que el PBAT se funde como un pico amplio a aproximadamente 123 °C y cristaliza como un pico sagrado a aproximadamente 60 °C. Al mismo tiempo, la temperatura de pérdida de peso del 5% del PBAT es superior a 350 °C. De los datos se puede ver que PBAT tiene buena cristalización y estabilidad térmica. Y como resultado, tiene una buena estabilidad de procesamiento para usarse solo o mezclado con otro material mediante procesos de fabricación convencionales como extrusión, intrusión y película soplada, etc. (Jian et al., 2020).

#### 2.5.2.4 Aplicaciones del PBAT

- **Embalaje**

Los envases de plástico convencionales se utilizan ampliamente en una serie de aplicaciones de recolección de basura y bienes de consumo debido a sus buenas propiedades y su bajo costo en comparación con otros materiales de empaque. En los últimos diez años, se generaron cada año alrededor de 14 millones de toneladas de residuos de envases de plástico convencionales, de las cuales sólo 1.6 millones de toneladas se recuperaron mediante el reciclaje y el resto terminó en vertederos. En un esfuerzo por reducir los envases de plástico convencionales, una de las técnicas de recuperación es el compostaje mediante el proceso de biodegradación. Como resultado, se están comercializando varios materiales biodegradables a base de PBAT que son compostables. Los envases basados en estos materiales han ganado actualmente gran atención en muchas disciplinas debido a sus propiedades únicas en comparación con los materiales plásticos convencionales (Youssef et al., 2019). Hay una serie de materiales a base de PBAT compostables disponibles comercialmente que podrían procesarse aún más para crear un paquete para las aplicaciones deseadas. Algunas de las empresas destacadas que han estado desarrollando materiales basados en PBAT son BASF, Novamont, BIOTECH y KINGFA, etc. Como uno de los líderes mundiales en plásticos biodegradables, KINGFA ha desarrollado varios materiales compostables basados en PBAT, almidón y PLA, etc., y han encontrado varias aplicaciones en envases, especialmente en bolsas de compras, bolsas de abono, etc., como se muestra en la Fig. 2.13 . Las bolsas de compras supervisadas por KINGFA basadas en

mezclas de almidón y PBAT se han utilizado ampliamente en supermercados de alto nivel en China, lo que se ha convertido en un modelo para la aplicación de plásticos biodegradables en China (Jian et al., 2020).




*Figura 2.13 Aplicaciones de productos basados en PBAT. Fuente: (Jian et al., 2020).*

- **Películas de matillo**

La agricultura moderna depende en gran medida del uso de películas de plástico convencionales, porque estas películas pueden aumentar el rendimiento de los cultivos elevando la temperatura del suelo, conservando la humedad del suelo, controlando el crecimiento de malezas y brindando protección contra las inclemencias del tiempo y las plagas. Se prevé que el mercado mundial de películas agrícolas alcance un volumen anual de 7.5 millones de toneladas para 2021, y China utiliza la mayor cantidad de películas de mantillo de PE, con 1.5 millones de toneladas al año. Una vez que estas películas de mantillo de PE se han agotado, es difícil recuperarlas por completo de los campos agrícolas, debido a la fragilidad y fragmentación de la película de PE causada por la intemperie, particularmente cuando se utilizan películas delgadas. Como resultado, las películas de PE residuales ingresan y posteriormente se acumulan en los suelos agrícolas, lo que disminuye la productividad del suelo al bloquear la infiltración de agua, impedir el intercambio de gases del suelo, limitar el crecimiento de las raíces y alterar las estructuras de la comunidad microbiana del suelo (Dilara & Briassoulis, 2000).

Un enfoque prometedor para superar la acumulación de películas de mantillo de PE residuales en los suelos es reemplazar las películas de mantillo convencionales con biodegradables compuestas de polímeros diseñados para ser degradables por los microorganismos del suelo. Las películas de mantillo biodegradables colocadas en el suelo son susceptibles de envejecimiento y degradación durante su vida útil, por lo que deben tener algunas propiedades específicas (Briassoulis, 2004).

KINGFA ha desarrollado películas de mantillo a base de PBAT para cumplir con los requisitos agrícolas, como se muestra en la Figura 2.13. Cuando se aplican en el suelo, las películas de mantillo a base de PBAT pueden verse poco afectadas por el agua, las altas temperaturas y la radiación UV durante su vida útil y pueden ser completamente biodegradables después de su vida útil. Las películas agrícolas fabricadas por KINGFA basadas en compuestos de PBAT/PLA/nanopartículas se han aplicado y logrado resultados positivos en muchas regiones y cultivos de China, lo que sienta una buena base para futuros desarrollos en China (Jian et al., 2020).

## 2.6 Compuestos poliméricos que contienen G/PBAT/Almidón

Zhang y colaboradores diseñaron y desarrollaron un novedoso elastómero de base biológica mediante extrusión reactiva para mezclas de almidón, glicerol y ácido tartárico (TPS-TA). Luego se extruyó TPS-TA con PBS (30:70 % en peso) para fabricar los biocompuestos y la resistencia al impacto de PBS/TPS-TA fue superior a la de PBS. El mecanismo de tenacidad se exploró analizando sistemáticamente las variaciones de las propiedades de la matriz TPS-TA y PBS, y su adhesión interfacial (Zhang et al., 2019). En resumen, cuando se extruye TPS-TA con PBS, la resistencia al impacto de PBS/TPS-TA2 aumenta de 2.8 a 6.3 KJ/$m^2$. Al mecanismo de endurecimiento se le atribuye que el TPS-TA puede servir como elastómero para mejorar la tenacidad del PBS. Además, TPS-TA2 se dispersa uniformemente en una matriz de PBS con un diámetro promedio de 0.50 μm en forma de elipse debido a las disminuciones de $M_n$ del almidón y la viscosidad de la masa fundida de TPS. Al mismo tiempo, la corporación TA eleva la compatibilidad de la matriz TPS y PBS debido a su efecto de acoplamiento.

Fahrngruber y colaboradores presentaron estudios del efecto del ácido málico (MA) en los parámetros de procesamiento y en la calidad de las películas de T PS/poli (adipato de butileno - cotereftalato). Los enantiómeros MA D (+) y L (-), así como el racemato, se aplicaron en diversas concentraciones (0.2, 0.4 y 0.8% en peso). Los resultados indican que la adición de MA racémico en concentraciones de 0.2% y 0.4% mejoró significativamente la procesabilidad del TPS al mismo tiempo, se encontraron efectos tales como ductilidad mejorada y características desorción de agua. (Fahrngruber et al., 2017).

Gámez y colaboradores investigaron el efecto del caucho de neumáticos molido (GTR) tratado con acetona sobre las propiedades mecánicas y morfológicas de la matriz de etileno-acetato de vinilo (EVA). Los

compuestos poliméricos EVA/GTR (0, 10, 20, 30 y 40 phr) se lograron mediante procesos de extrusión y formación de espuma por lotes. Los análisis TGA y NMR revelaron que los aceites y aditivos se eliminaron del GTR después del tratamiento con acetona. La caracterización morfológica mostró tamaños celulares inferiores a 100 μm en los compuestos tratados con GTR, lo que mejoró el rendimiento mecánico de los compuestos EVA/ GTR. Los resultados indicaron que los GTR tratados con acetona son una materia prima adecuada para obtener compuestos de espuma útiles en aplicaciones de aislamiento y absorción de vibraciones (Gámez et al., 2022). (Figura 2.14).

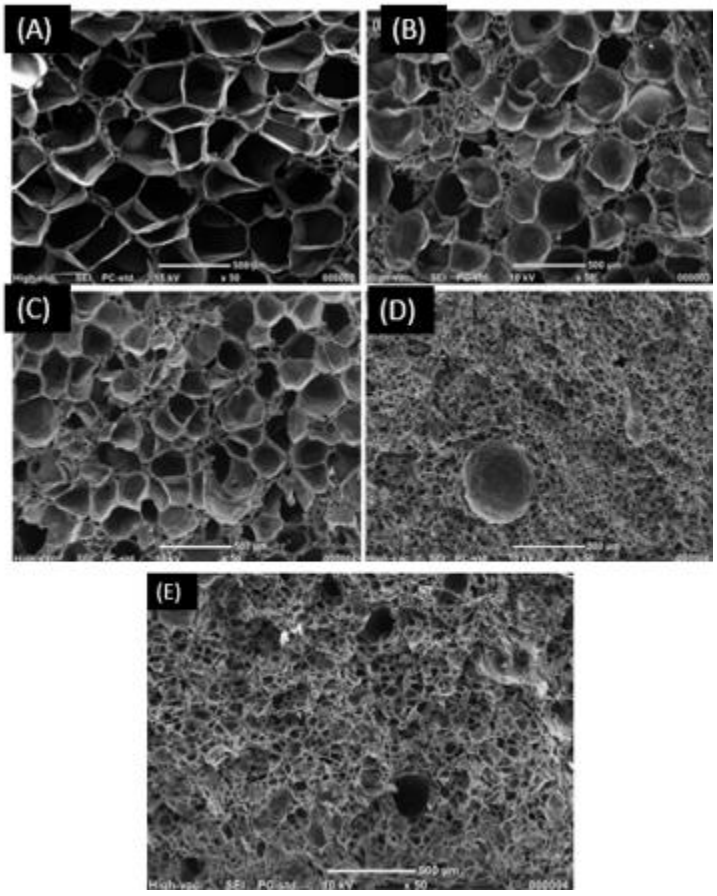



*Figura 2.14* Micrografía SEM de espumas EVA/GTR.(*A) Micrografía SEM de compuesto de espuma polimérica (referencia); (B) Micrografía SEM de compuesto de espuma polimérica (GTR sin tratar con EVA/30); (C) Micrografía SEM de compuesto de espuma polimérica (GTR sin tratar EVA/40); (D) Micrografía SEM de compuesto de espuma polimérica (GTR tratado con EVA/30); (E) Micrografía SEM de compuesto de espuma polimérica (GTR tratado con EVA/40). Fuente: (Gámez et al., 2022)*

Waisarikit y colaboradores investigaron la producción envases film biocompuestos para frutas y verduras frescas a base de ácido poliláctico; PLA, succinato de polibutileno; PBS y relleno natural (posos de café modificados; SCG y almidón de yuca; ST) mediante el uso de una extrusora de película soplada. La película biocompuesta varió en el porcentaje en peso de ST al 0, 5 y 10% en peso contenido de control de PBS al 5% en peso y SCG al 5% en peso. Las propiedades mecánicas de la mezcla de PLA con PBS pueden mejorar

el porcentaje de alargamiento de la película biocompuesta. El almidón de yuca actúa como agente nucleante presente al disminuir la temperatura de cristalización en frío y aumentar el grado de cristalinidad, así como inducir la movilidad de la cadena, presentada en una ligera disminución de la temperatura de transición vítrea. (Waisarikit et al., 2023).

Xu y colaboradores presentaron en su trabajo, el poli (adipato de butileno co-tereftalato)/almidón termoplástico/etilen-acrilato de metilo-metacrilato de glicidilo (PBAT/TPS/EGMA) con alta tenacidad se prepararon mediante composición en estado fundido. El alargamiento de rotura aumentó significativamente de 533±125 % para la mezcla PBAT/TPS (60/40) hasta 1188±28 % para la mezcla PBAT/TPS/EGMA(60/40/2). Según el análisis de la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR) y el microscopio electrónico de barrido (SEM), la mejora de la tenacidad provocada por la adición de EGMA se puede atribuir a la compatibilidad mejorada entre PBAT y TPS y al refinamiento del tamaño de las partículas de TPS. El conocimiento obtenido de este estudio proporciona un método para mejorar la tenacidad de compuestos poliméricos biodegradables con alta carga de TPS, lo que facilitará la aplicación práctica del almidón en el campo del embalaje (Xu et al., 2023).

Nakason y colaboradores, sintetizaron copolímeros de injerto de caucho natural y anhídrido maleico (NR -g- MA) o caucho natural maleado (MNR) en una solución de tolueno. Se usó peróxido de benzoílo (BPO) para iniciar la copolimerización por injerto de radicales libres. Se investigó la influencia de las concentraciones de monómero e iniciador junto con el efecto de la temperatura y el tiempo de reacción. Las cantidades de anhídrido injertado (MA) se determinaron mediante valoración de las funciones de ácido carboxílico derivadas de las funciones de anhídrido. La estimación del nivel de MA injertado también se realizó utilizando la relación de absorbancia IR de los picos en 1780-1784 $cm^{-1}$ más 1854 $cm^{-1}$ a 835 $cm^{-1}$, descubrieron que las cantidades de MA injertado en moléculas de NR aumentan al aumentar las concentraciones de monómero e iniciador (Figura. 2.15). El aumento del tiempo de reacción y de la temperatura de reacción también provoca niveles crecientes de MA injertado. También encontraron que la temperatura de transición vítrea del MNR era mayor que la del NR puro Además, los valores de Tg aumentan al aumentar la concentración de monómero usado en la copolimerización por injerto (Nakason et al., 2004).

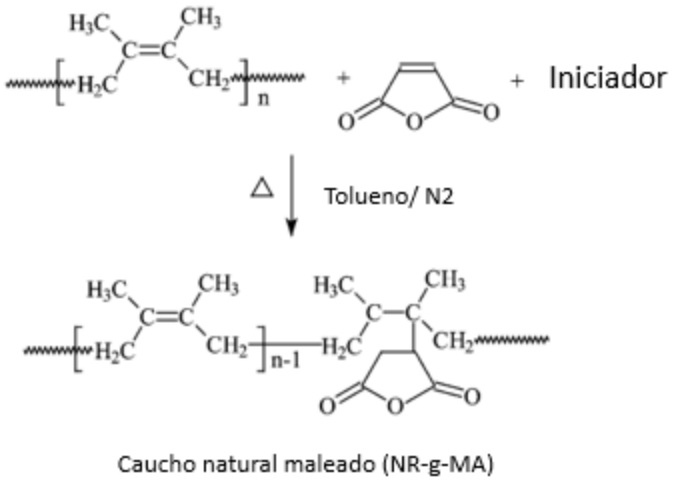



*Figura 2.15 Reacción decis-1,4-poliisopreno y anhídrido maleico. Fuente: (Nakason et al., 2004).*

Spiridon y colaboradores mezclaron con éxito diferentes residuos de biomasa con almidón y Ecoflex®. Poli (adipato -co -tereftalato de butileno), sin adición de glicerol, para la obtención de materiales biocompuestos. Se evaluaron las propiedades mecánicas, así como las propiedades térmicas y superficiales de los compuestos desarrollados. Se encontró que la resistencia a la tracción y la resistencia al impacto mejoraron con la adición de lignina, mientras que la capacidad de absorción de agua disminuyó. La presencia de 5% de lignina determinó un aumento en la resistencia a la tracción del 125.4% para los materiales que comprenden apio (CEL), del 109.6% para los materiales que comprenden fibras capilares de semillas de álamo (PSH), del 92.9% para los materiales que comprenden orujo (POM) y del 127.7% para los materiales que comprende fibras de Asclepias syriaca (PPA), en comparación con una muestra de referencia. La adición de lignina a todas las formulaciones confirió buenas propiedades antimicrobianas contra diferentes microorganismos, S. aureus y especialmente E. coli. Las buenas propiedades mecánicas, la resistencia al agua y la actividad antimicrobiana contra patógenos recomiendan el uso de estos compuestos en la fabricación de materiales de embalaje (Spiridon et al., 2020).

Cai y colaboradores presentaron una investigación en la cual la experimentación fue con material sostenible, el almidón de patata termoplástico (TPS), se mezcló con caucho natural modificado y caucho natural epoxidado (ENR). Las malas propiedades mecánicas de las mezclas ENR/TPS limitaron la aplicación. La vulcanización con azufre es un método común y económico para mejorar las propiedades mecánicas en la industria del caucho. Para comprender completamente la relación entre los sistemas de vulcanización y las mezclas ENR/TPS y la sostenibilidad del material desarrollado, se analizaron los efectos de un acelerador de vulcanización (N-ciclohexilbenzotiazol-2-sulfenamida (CBS), 2-mercaptobenzotiazol (MBT), N-terc-Se evaluaron sistemáticamente butilbenzotiazol-2-sulfenamida (TBBS)) y un tipo de sistema (vulcanización convencional (CV), vulcanización semieficiente (SEV) y vulcanización eficiente (EV))

sobre las características de curado, las propiedades mecánicas y térmicas, la absorción de agua y la biodegradabilidad. Los resultados indican que la vulcanización mejora significativamente las propiedades mecánicas de las mezclas ENR/TPS. La optimización del rendimiento del sistema de vulcanización CBS-CV es la mejor para mejorar las propiedades mecánicas y reducir la absorción de agua. El sistema de curado CBS-CV hace que ENR/TPS sea menos biodegradable (entre un 12 % y un 56 % de pérdida de masa) que otros aceleradores y sistemas. TBBS-CV hace que el material sea más biodegradable (entre el 18% y el 66% de la pérdida de masa). El bajo contenido de caucho permite la rápida biodegradación de la mezcla vulcanizada. Esto tiene implicaciones para la investigación sobre materiales sostenibles. El material se puede aplicar para embalajes ecológicos y películas agrícolas, etc. La investigación sobre el rendimiento mediante el uso de aceleradores y sistemas comunes proporciona ideas para las industrias y la investigación (Cai et al., 2022).

Candau y colaboradores prepararon mezclas de ácido poliláctico (PLA)/caucho para neumáticos molidos (GTR) utilizando peróxido de dicumilo (DCP) como agente reticulante con los siguientes objetivos: proponer una nueva ruta para reciclar residuos de caucho de la industria automotriz y mejorar la dureza y resistencia al impacto del PLA de base biológica inherentemente frágil. Los GTR se sometieron a dos tipos de procesos de molienda (criomolienda y molienda en ambiente seco). Las mediciones de hinchamiento revelaron que el rectificado estaba asociado con un daño mecánico de las cadenas de caucho, independientemente del tipo de rectificado o del tamaño del GTR (de <400 µm a <63 µm). Además, el GTR más fino contiene la mayor cantidad de elementos de refuerzo (negro de carbón, arcilla) que pueden usarse ventajosamente en mezclas de PLA/GTR. De hecho, el uso del GTR criomolido más fino en presencia de DCP mostró la menor disminución de la resistencia a la tracción (-30%); mantenimiento del módulo de tracción y la mayor mejora de la tensión de rotura (+80%), la energía de rotura (+60%) y la resistencia al impacto (+90%) en comparación con el PLA puro. Los resultados se atribuyeron a la buena dispersión de las partículas finas de GTR y de arcilla en la matriz de PLA. Además, se espera que una posible reticulación de las partículas de GTR y/o co-reticulación en la interfaz PLA/GTR en presencia de DCP contribuya a dicha ductilidad y resistencia al impacto mejoradas (Candau et al.).

Fazil y colaboradores realizaron amplias investigaciones sobre el uso de estos neumáticos fuera de uso como rellenos en aplicaciones de ingeniería civil (hormigón y asfalto), así como sobre su mezcla con matrices poliméricas (termoplásticos, termoestables o caucho virgen). Investigaron varias tecnologías de trituración, como los procesos ambientales húmedos o criogénicos, que se utilizan ampliamente para reducir el tamaño de los neumáticos de desecho y convertirlos en caucho de neumáticos triturados (GTR) con una superficie específica más grande. Hicieron hincapié en el uso de GTR como reemplazo parcial en compuestos de caucho virgen. En su artículo también presentaron una revisión de los posibles tratamientos

superficiales físicos y químicos para mejorar la adhesión del GTR y la interacción con diferentes matrices, incluyendo procesos de regeneración del caucho como el termomecánico, microondas, ultrasónico y termoquímico produciendo caucho regenerado para neumáticos (RTR). Incluyeron una discusión detallada sobre el efecto del tamaño de partícula GTR/RTR, la concentración y el nivel de reticulación sobre las propiedades de curado, reológicas, mecánicas, de envejecimiento, térmicas, dinámicas, mecánicas y de hinchamiento de los compuestos de caucho. Finalmente brindaron una conclusión sobre la situación actual con aperturas para futuros trabajos.(Fazli & Rodrigue, 2020a)

Zhorina y colaboradores produjeron compuestos de caucho granulado y almidón de diversas composiciones mediante deformación por cizallamiento en un mezclador de tipo cerrado (Brabender). Encontraron que la introducción de almidón aumenta el módulo elástico, disminuye el alargamiento de rotura y apenas influye en la resistencia última a la tracción. Es probable que el aumento observado en los parámetros mecánicos después de la exposición al suelo se deba a la reticulación bajo la acción ambiental, lo cual fue confirmado mediante espectroscopía IR. Utilizando microtomografía de rayos X, calcularon la porosidad de la matriz y se demostró que la exposición al suelo aumentaba la porosidad (Zhorina et al., 2018).

Como se describió en la literatura, ya se han reportado diversas investigaciones en donde se han mezclado algunas matrices biodegradables como el ácido poliláctico (PLA) Polibutilen Succinato (PBS), almidón termoplástico (TPS), con el polvo de llanta o algún otro caucho, sin embargo, aún no hay reportes del efecto de la modificación del GTR con acetona y su efecto en las propiedades de compuestos de PBAT y almidón.

# 3. DESARROLLO

## 3.1 Materiales

A continuación, se mencionan los materiales utilizados en el proyecto, así como su composición y proveedor.

### 3.1.1 Polvo de llanta

El polvo de llanta (GTR) se obtuvo a partir de neumáticos usados enteros mediante un proceso de rectificado mecánico a temperatura ambiente, libre de cordones y alambres, con una densidad de 1.08 g/cm$^3$. El polvo se separó en tamices de malla -100 a +200, obteniendo una distribución granulométrica entre 25 y 220 µm.

### 3.1.2 Almidón

El almidón de maíz se compró en Ingredion (Zapopan, Jal. México).

### 3.1.3 PBAT

El poli (Butilén Adipato-co-Tereftalato) (PBAT) se adquirió de Ecoworld® (Ciudad de Taiyuan, Provincia de ShanXi, República Popular China). El PBAT es un compuesto polimérico biodegradable modificado, desarrollado y fabricado por Jin Hui Zhao Long.

## 3.2 Métodos

### 3.2.1 Lavado del polvo de llanta

Se instalaron 6 equipos de extracción soxhlet interconectados en serie a un baño con refrigeración, programado a 8 °C (Figura 3.1). Dentro de los equipos se colocan cartuchos de celulosa con 20 gramos de polvo de llanta para cada uno. Las muestras fueron sometidas a un proceso de extracción de 24 horas empleando acetona como solvente de extracción.

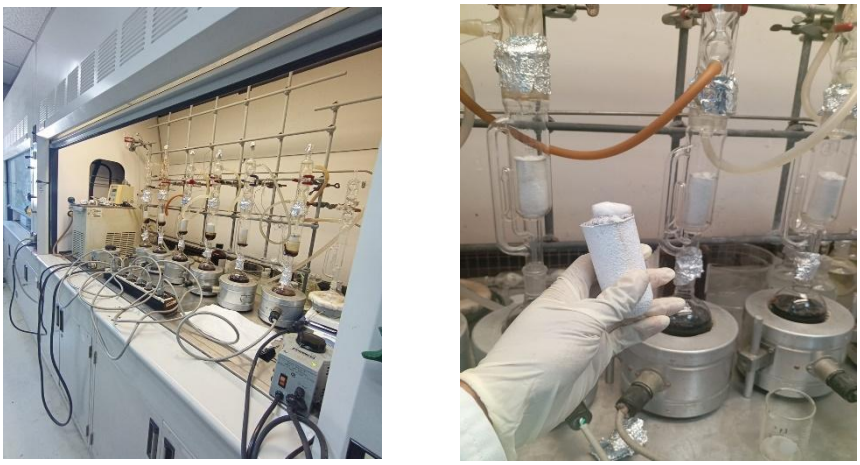


*Figura 3.1 Equipo Soxhlet. Creación propia C. Reyes, 2024*

Los cartuchos con el polvo lavado fueron colocados en una estufa a 70 °C por 24 horas para la remoción total del solvente (Figura 3.2).



*Figura 3.2 Secado de cartuchos.*
*Creación propia C. Reyes, 2024*

Una vez pasadas las 24 horas de secado, se extrajo el polvo de los cartuchos, para vaciarlos en una bolsa y etiquetar. El proceso se repitió hasta lavar 480 gramos de polvo de llanta.

### 3.2.2 Formulado de muestras para la cámara Brabender

Se prepararon 7 muestras de 70 gramos cada una, el porcentaje en peso de los componentes utilizados se muestran en la Tabla 3.1.

*Tabla 3.1 Porcentaje en peso de las muestras. Creación propia C. Reyes, 2024*

| | PBAT (%) | Almidón (%) | GTR (%) |
|---|---|---|---|
| **Muestra** | | | |
| **M1** | 50 | 50 | - |
| **M2** | 45 | 45 | 10 (G) |
| **M3** | 35 | 35 | 30 (G) |
| **M4** | 25 | 25 | 50 (G) |
| **M5** | 45 | 45 | 10 (MG) |
| **M6** | 35 | 35 | 30 (MG) |
| **M7** | 25 | 25 | 50 (MG) |

### 3.2.3 Procesado de compuestos

Se utilizó una cámara de mezclado de 75 $cm^3$ de capacidad marca Brabender, se operó bajo las siguientes condiciones de procesamiento: 5 minutos de residencia para cada lote, a una velocidad de 60 rpm y una temperatura de 130 °C.

Para la alimentación del equipo, comenzando por la muestra control (PBAT/Almidón), se vertió primero el PBAT, después el almidón, inmediatamente ingresada toda la alimentación se cierra la cámara. Se deja 5 minutos de residencia de mezclado, una vez pasado el tiempo se abre la cámara y se extrae el compuesto para posteriormente pasarla a una placa de acero de $150mm^3x150mm^3x1mm^3$, donde encima se coloca otra placa con las mismas dimensiones. Para evitar contaminaciones se debe limpiar la cámara y sus componentes en su totalidad.

Posteriormente para las mezclas faltantes, se repitió el mismo procedimiento ahora añadiendo polvo de llanta como tercer componente. En todas las mezclas se siguió el siguiente orden de ingreso a la cámara:

1. PBAT
2. Almidón
3. Polvo de llanta (modificado y no modificado)

### 3.2.4 Moldeo mediante compresión

Para el moldeo por compresión se utilizó una prensa hidráulica de calentada previamente a 130 °C, posteriormente se colocaron las placas de $150mm^3x150mm^3x1mm^3$ dentro de la prensa a 25 toneladas de presión, con un tiempo de residencia de 5 minutos.

Una vez transcurrido los 5 minutos se retiraron las placas de $150mm^3x150mm^3x1mm^3$ fueron enfriadas por 5 minutos a una presión de 25 toneladas. Se repitió el mismo procedimiento para cada placa.

### 3.2.5 Suaje de placas

Para extraer probetas de las placas obtenidas se utilizó un suajador (Figura 3.3) con un suaje tipo I (Figura 3.4). Se extrajeron 5 probetas por cada placa, así como el material restante entre placas, estas para las respectivas pruebas de caracterización.




*Figura 3.3 Suaje tipo I. Creación propia C. Reyes, 2024*



*Figura 3.4 Suajador. Creación propia C. Reyes, 2024*

## 3.3 Técnicas de caracterización

En este apartado, se presentan las principales técnicas de caracterización empleadas en el análisis de los compuestos, resaltando su importancia en la identificación y optimización de materiales biodegradables.

### 3.3.1 FTIR

Se realizaron análisis de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) utilizando un espectrómetro infrarrojo Nicolet Magna-550. Se empleó la técnica de reflectancia atenuada (ATR-FTIR) en un rango de longitud de onda de 4000 a 500 $cm^{-1}$. Con el equipo del ATR de 120 barridos y una resolución de 16 $cm^{-1}$.

### 3.3.2 TGA

La degradación térmica se analizó en un TGA Q500 (TA, Instruments, EEUU), el rango de temperaturas de 30 a 600°C y con una velocidad de calentamiento 10 °C/min en una atmósfera de nitrógeno. Después de

los 600°C se utilizó una atmósfera de oxígeno para favorecer la combustión completa de los compuestos orgánicos. Para calcular la pérdida de peso y su derivada, se utilizó el software del equipo.

### 3.3.3 DMA

El comportamiento dinámico de las muestras se evaluó utilizando un analizador mecánico dinámico Q800 (TA Instruments). Se empleó una configuración de tensión para todas las muestras. Las mediciones de análisis mecánico dinámico (DMA) se realizaron a una frecuencia fija de 1 Hz con una amplitud de oscilación de 20 μm. Las mediciones se realizaron de 30°C a 180 °C y una velocidad de calentamiento de 5 C/min. Las dimensiones de la muestra fueron de 5 x 25 mm2 con un espesor de 2 milímetros.

### 3.3.4 Propiedades mecánicas de las películas

Las pruebas de tracción se realizaron bajo la norma ASTM D-638 en un aparato de tensión CEF-80, utilizando una velocidad de deformación de 5 mm/min a 25°C; Se ensayaron cinco probetas (tipo I: ancho de 6 mm y largo de 115 mm con un espesor de 2 mm) para cada muestra.

### 3.3.5 SEM

Las imágenes electrónicas de barrido fueron recolectadas por medio de un microscopio (JEOL JCM6000) con potencia de 15 kV, las muestras se fijaron con una cinta doble cara de cobre, posteriormente se recubrieron con oro-paladio.

# 4. RESULTADOS

## 4.1. Caracterización del polvo de llanta

En los siguientes apartados se discuten los resultados obtenidos de las técnicas de caracterización empleadas en el polvo de llanta.

## 4.2. Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

En la Figura 4.1 se observan los espectros FTIR del G y MG lavado con acetona en un equipo soxhlet por 24 horas y en la Tabla 4.1 se muestran las bandas con sus respectivos grupos funcionales. La banda ancha y amplia ubicada entre 3442 $cm^{-1}$y 3293 $cm^{-1}$ corresponde a los grupos hidroxilo (O-H), se observa que esta disminuye su intensidad en el MG, lo cual esta atribuido a una mayor eliminación de la humedad en el polvo tratado. Los picos de los hidrocarburos alifáticos presentes a 2906 y 2852 $cm^{-1}$, corresponden a los elastómeros (Gámez et al., 2022) se ha reportado que entre la bandas 2968 y 2889 $cm^{-1}$, se encuentra un acelerador (TMTM) que se utiliza en la fabricación de neumáticos (Sanches et al., 2014) la acetona disuelve este compuesto, elimina no solo el TMTM, sino también componentes (antioxidantes, plastificantes, aceleradores secundarios) relacionados con el caucho que contienen grupos C-H, aunque los elastómeros principales no se disuelven, los aditivos contribuyen significativamente a la intensidad de las bandas, y su extracción altera las características espectrales. La banda del GTR sin tratar presente en 1540 $cm^{-1}$ es característico del estereato de zinc y el pico en 1400 $cm^{-1}$ corresponde a las vibraciones de tijera del butadieno (Colom et al., 2007). El espectro FTIR del MG lavado con acetona muestra una notable reducción en la intensidad de la banda en 1417 $cm^{-1}$, asociada al enlace C-H del butadieno, y en 1642 $cm^{-1}$, correspondiente al grupo C=C del poliisopreno (Colom et al., 2007), Además, la banda en 1540 $cm^{-1}$, atribuida al enlace C=H, desapareció por completo, este comportamiento sugiere que el proceso de lavado con acetona ha eliminado eficazmente algunos aditivos solubles, como el estearato de zinc, que interfieren en el espectro FTIR. Al eliminar estos aditivos, se reducen las señales de los enlaces C=C y C-H en el espectro del polvo tratado, lo que aclara las bandas espectrales originales y facilita una interpretación más precisa de los componentes del caucho (Merriman et al., 2022).

*Tabla 4.1 Intervalos de frecuencia (FTIR). Creación propia C. Reyes, 2024*

| **Número de onda ($cm^{-1}$)** | **Atribución** |
|---|---|
| **1400** | C-H (vibraciones) |
| **1540** | C=H (Estearato de Zinc) |
| **2852-2906** | C-H (Elastómeros) |
| **3293 – 3442** | O-H (Grupos hidroxilo ) |

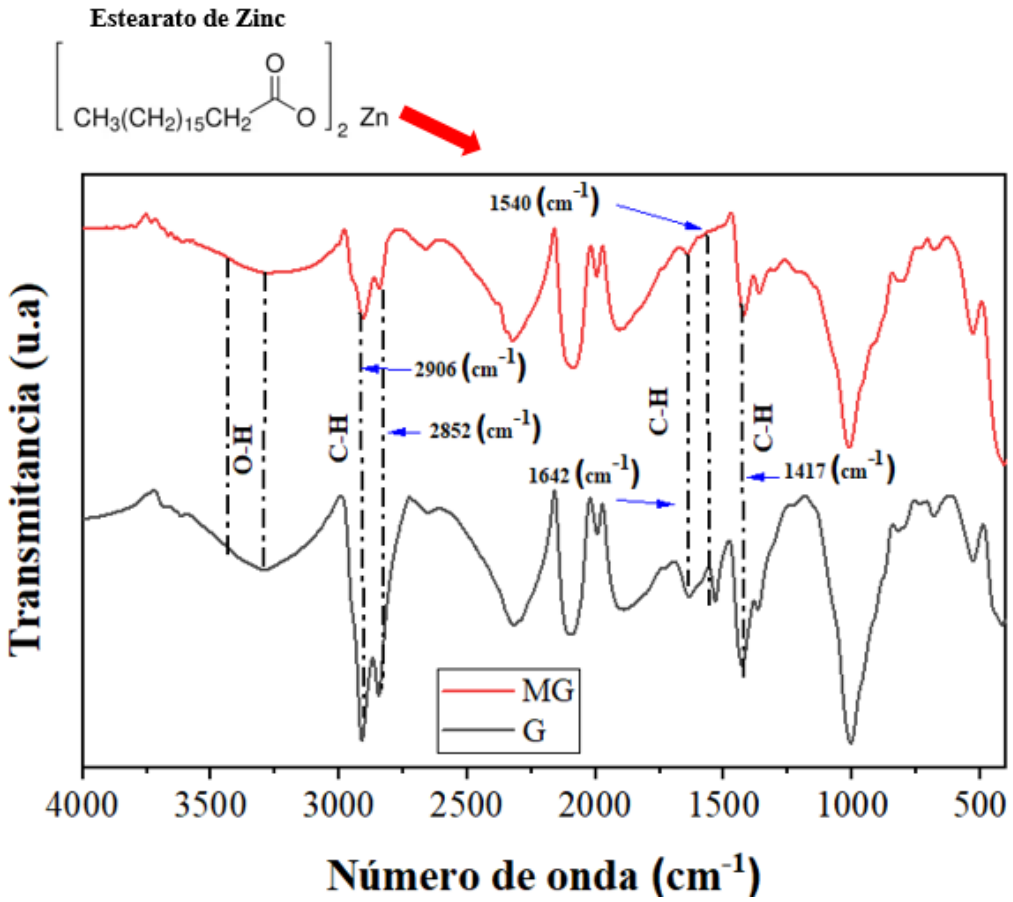



*Figura 4.1 Espectro FTIR del G y el MG. Creación propia C. Reyes, 2024*

## 4.3. Análisis termogravimétrico (TGA)

Se realizó el análisis termogravimétrico (TGA) en el polvo de llanta sin modificar y el modificado (Figura 4.2 y 4.3). Los termogramas TGA de manera general mostraron las principales pérdidas de peso, con rangos de temperatura de 61.28°C a 360 °C, donde se atribuye a la volatización de plastificantes como los aceites empleados en la producción de neumáticos, 360 °C a 415°C y de 415°C a 600°C que corresponden a la degradación de elastómeros y a la combustión del negro de humo respectivamente (Gámez et al., 2022).

El G presento 22.61% de plastificantes/aceites, 13.407% de elastómeros, 33.23% de negro de humo y 25.28% de residuos. Se observa una reducción significativa en la primera pérdida de masa y en la derivada de la curva del MG, lo que indica que algunos aceites y aditivos del polvo de llanta se eliminaron mediante el tratamiento con acetona. En particular en ese rango de pérdida de peso, uno de los componentes que pierde propiedades posiblemente degradación de carbonos es el estearato de zinc (Gönen et al., 2008) este compuesto es soluble en acetona (Gámez et al., 2022), esto se puede corroborar en los análisis FTIR debido a una reducción en el pico que le corresponde al estearato de Zinc.

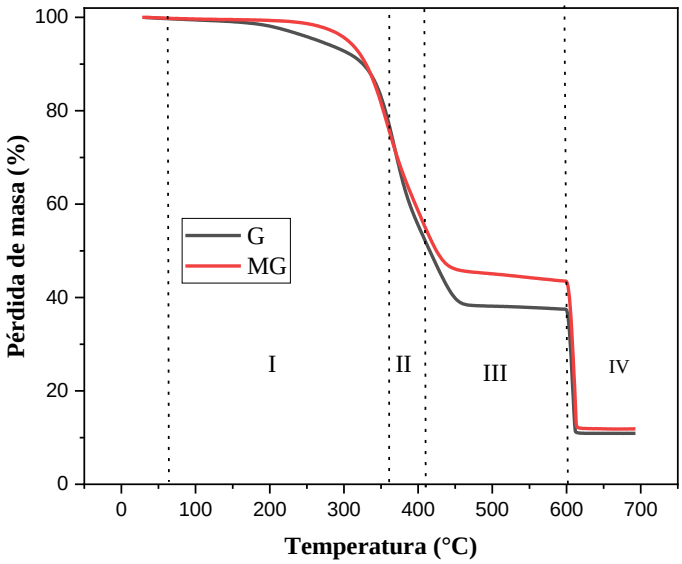



*Figura 4.2 Termogramas de pérdida de peso. Creación propia C. Reyes, 2024*

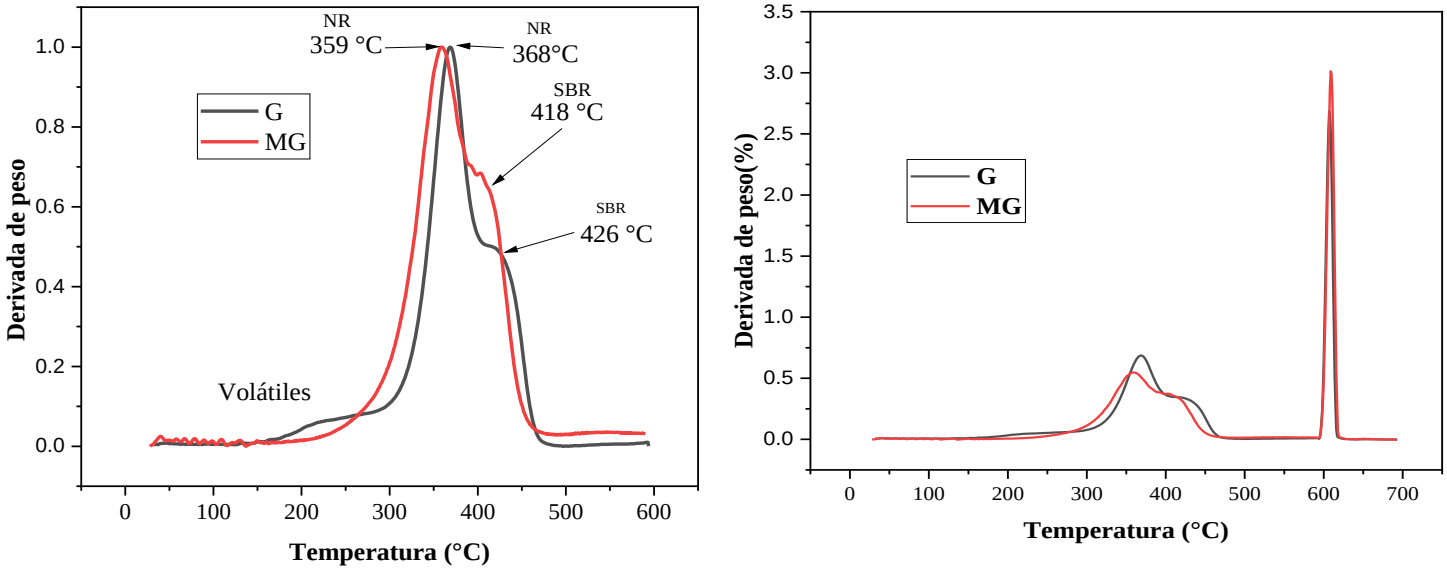



*Figura 4.3 Termogramas de G y MG. Creación propia C. Reyes, 2024*

## 4.4. SEM

Se realizó un análisis SEM para observar la morfología del polvo de llanta modificado y no modificado e inspeccionar las diferencias entre ambas partículas. El GTR sin modificar (Figura 4.4 *a*, 4.4 *c*) presenta una mayor cantidad de partículas blancas (como indican las flechas rojas), relacionadas con partículas de sílice presente en las formulaciones de los neumáticos, esto debido a que el tratamiento con acetona también es capaz de remover $SiO_2$ (Gámez et al., 2022). Las partículas del polvo de llanta con y sin tratamiento mostraron una superficie irregular, partículas rugosas, lo que se relaciona con las características intrínsecas de estos polvos (Gámez et al., 2022) también adoptan esas formas debido al proceso de su reducción de tamaño. Los filamentos presentes (encerrados en recuadros rojos) corresponden a fibras del polvo que se filtraron durante su molienda. Por otro lado, no se observó alguna diferencia significativa en la superficie en los 2 tipos de partículas.

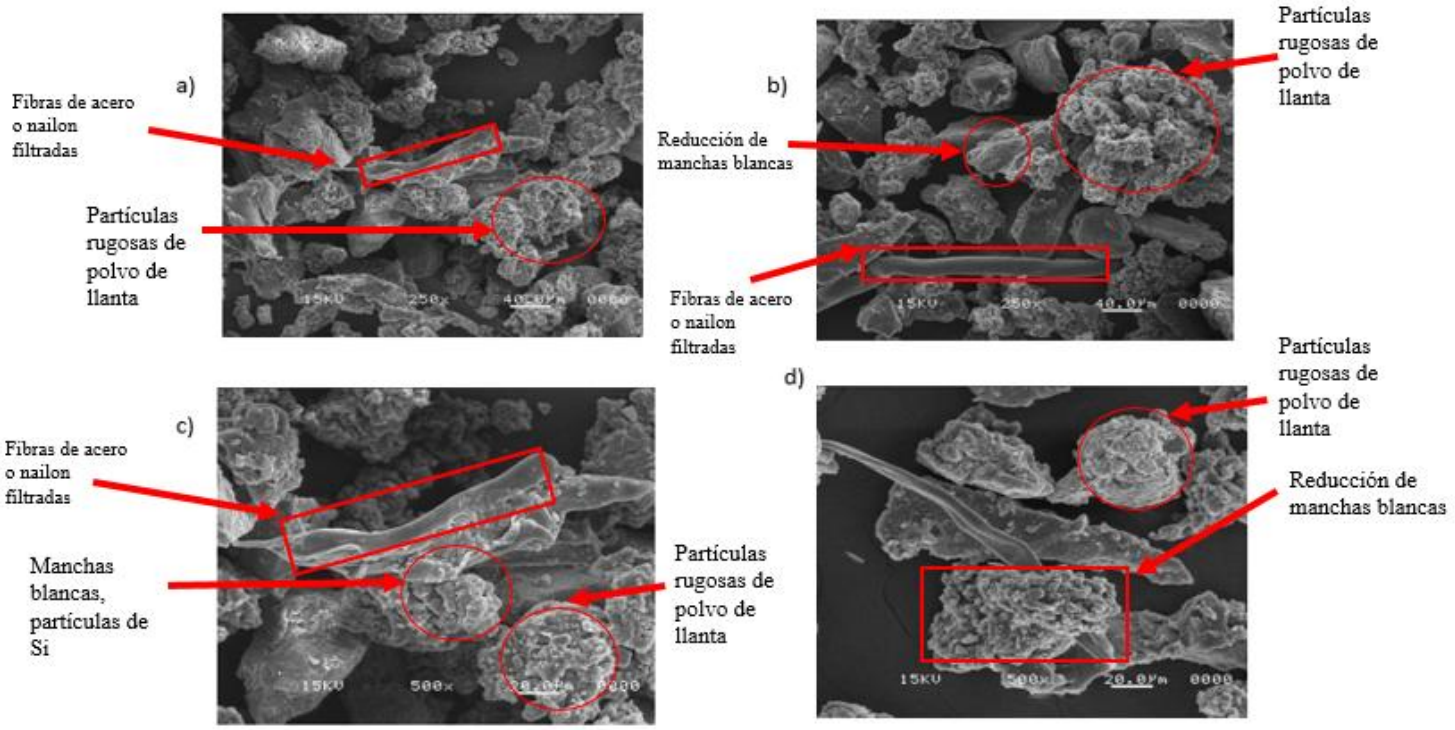



*Figura 4.4 Micrografías SEM de polvo de llanta modificado y no modificado a) G a 250 x, b) MG a 250 x, c) G a 500 x, y d) MG a 500 x. Creación propia C. Reyes, 2024*

## 4.5. Ángulo de contacto

En la figura 4.5 se muestran los resultados del ángulo de contacto. Los valores numéricos del ángulo de contacto indican que el polvo de llanta sin modificar tiene un ángulo de contacto de 138°, lo que sugiere que es altamente hidrofóbico y presenta baja mojabilidad. En contraste, el polvo de llanta modificado, con un ángulo de contacto de 127°, muestra una disminución en la hidrofobicidad, lo que sugiere una mejor mojabilidad. Esta diferencia indica que el lavado con acetona ha modificado la superficie del polvo de llanta, posiblemente eliminando contaminantes o aditivos hidrofóbicos y exponiendo más grupos funcionales polares en la superficie, lo que resulta en una mayor afinidad por los compuestos polares presentes en la formulación como el almidón.

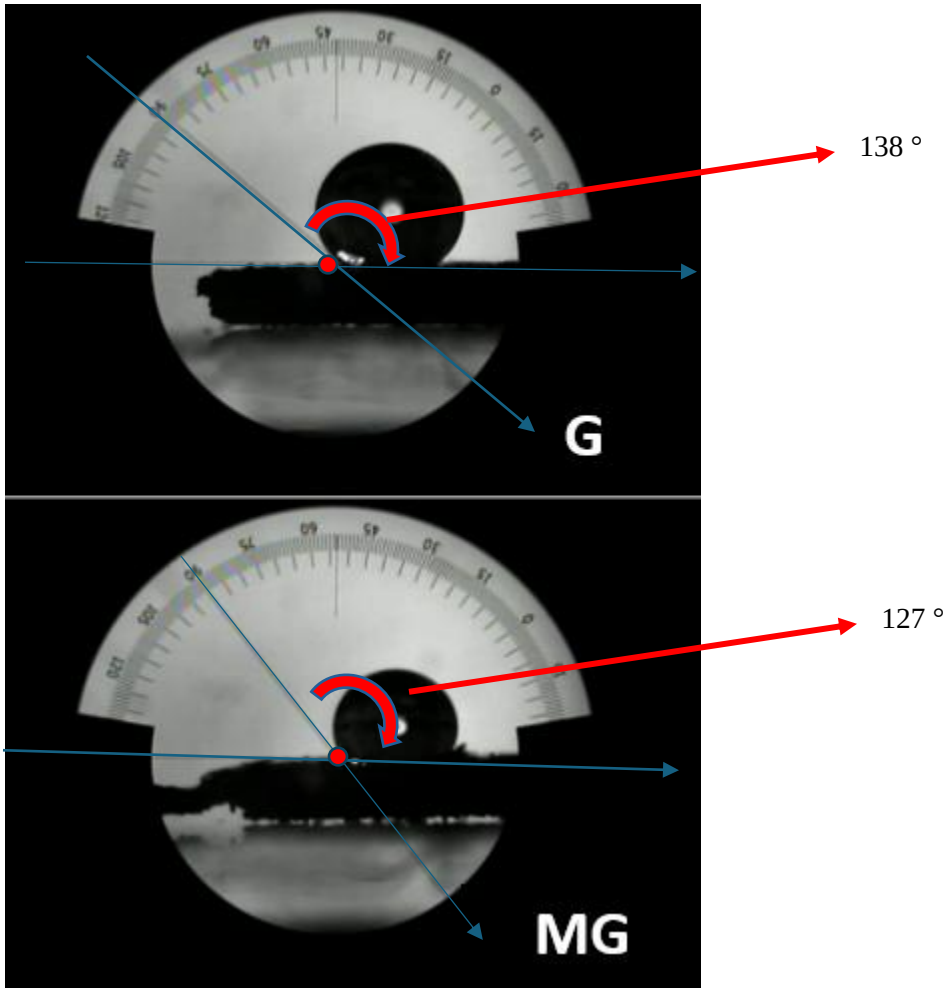



*Figura 4.5 Ángulo de contacto del GTR sin modificar (G) y modificado (MG). Creación propia C. Reyes, 2024*

## 4.6. Caracterización de los compuestos

En los siguientes apartados se discuten los resultados obtenidos de las técnicas de caracterización empleadas en los compuestos obtenidos.

### 4.6.1. FTIR de los compuestos

En la Figura 4.6 se puede apreciar los diferentes espectros de los compuestos a diferentes concentraciones de GTR 10% (PBAT/S/G/10), 30%, (PBAT/S/G/30) y 50 %(PBAT/S/G/50) y con polvo de llanta modificado (PBAT/S/MG/10, PBAT/S/MG/30, PBAT/S/MG/50). La banda presente a 1261 $cm^{-1}$ está asociada con la vibración de estiramiento del enlace CO, mientras que la banda a 1716 $cm^{-1}$ está relacionada con la vibración de estiramiento del carbonilo (C=C) en el grupo éster, ambas señales provienen del PBAT (Oliveira et al., 2017), también ocurre una ligera reducción de intensidad en las bandas 727 $cm^{-1}$ que representa a 4 o más grupos metilenos ($CH_2$ ) (Boonprasertpoh et al., 2020). Las bandas que aparecen en el rango de 1300 $cm^{-1}$ y 800 $cm^{-1}$ se les adjudica a los enlaces CC y CO del almidón, que a su vez está asociada a la cristalinidad del mismo, en la banda 1459 $cm^{-1}$ hay una pequeña señal que muestra la deformación simétrica del $CH_2$ grupo presente en la α-D-glucosa la unidad repetitiva de las macromoléculas de amilosa y amilopectina (Pozo et al., 2018). La banda 2956 $cm^{-1}$ (C-H) indica la presencia de hidrocarburos alifáticos que corresponden al polvo de llanta (Thomas et al., 2022). Cabe resaltar que no se presentaron diferencias significativas en los espectros de los compuestos, el único cambio destacable es una reducción en las intensidades en la banda 727 $cm^{-1}$ señal que se le adjudica al PBAT y representa a grupos metilenos ($CH_2$), al parecer al aumentar la concentración del polvo de llanta esta intensidad disminuye un poco, debido a que el polvo interfiere en el libre flujo de las cadenas poliméricas y provoca una reducción de los enlaces $CH_2$ .

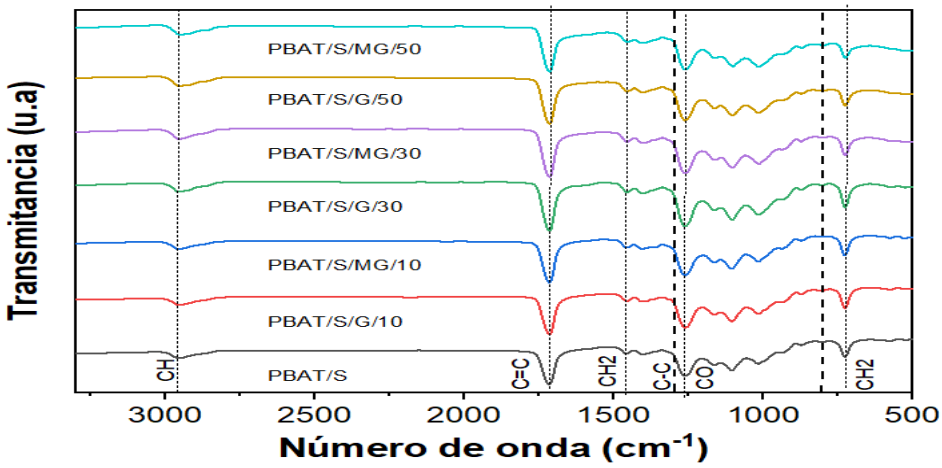



*Figura 4.6 Espectro FTIR de las mezclas de PBAT/S/GTR. Creación propia C. Reyes, 2024*

### 4.6.2. TGA de los compuestos

De manera general se observan 4 fases la primera de 50°C a 190 °C, la segunda de 190°C a 320°C, la tercera de 320 °C a 415°C y la cuarta de 415°C a 600°C, que corresponden a pérdida de humedad/aditivos, degradación del almidón/volatilización de algunos plastificantes, degradación de elastómeros/descomposición del PBAT y combustión del negro de humo respectivamente. Como se observa en la Tabla 4.2 la degradación del almidón se empalma con la de plastificantes/aceites, así como la descomposición del PBAT con los elastómeros.

En la Figura 4.7 se observan los termogramas TGA de los compuestos PBAT/S, así como los que contienen G y MG, en concentraciones del 10%, 30% y 50% y en la Figura 4.8 se muestra un termograma de la derivada de la pérdida en peso respecto a la temperatura de los mismos compuestos.

En el control destacan pérdidas de peso en 4 etapas, 2.607 % a 81.51°C, 1.393% a 167.82 °C y 35.766% a 309 °C a estas pérdidas se le atribuye la eliminación de la humedad, la liberación de compuestos volátiles y la degradación del almidón (Oliveira et al., 2017) respectivamente, la cuarta pérdida de 49.049% a 403 °C se refiere a la descomposición del PBAT y 10.233% de residuos inorgánicos (Oliveira et al., 2017). Al añadir polvo de llanta incrementaron los residuos inorgánicos a 600 °C del 2% al 16 %, en las concentraciones que van del 10% al 50% de G y MG, esto se debe a que aumento la fracción del polvo y disminuyo la cantidad de aditivos, lo que resultó en una mejor estabilidad térmica (Fazli & Rodrigue, 2020a).

Los termogramas de los compuestos siguen una tendencia, mientras más concentración de polvo de llanta (G, MG) presente en el compuesto, menor es la pérdida de peso. Destaca una disminución de peso en el rango de temperaturas de 190-320 °C para los compuestos que contienen MG en las concentraciones del 30% y 50%, en esta zona se encuentra el almidón y plastificantes/aceites. Esta pérdida está relacionada con el tratamiento al G, el cual mediante el lavado disolvió algunos hidrocarburos presentes en el estearato de Zinc (Kandah et al., 2017), y esa disolución se puede observar en la reducción del pico correspondiente al estearato de Zinc en los análisis FTIR del polvo de llanta.

*Tabla 4.2 Pérdida (%) de peso del control y compuestos. Creación propia C. Reyes, 2024*

| | Temperaturas pico TMAX (°C) | | | | | Pérdida de masa Δm (%) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Muestra | Volátiles | Plastificantes/ almidón | Elastómeros/ PBAT | Negro de humo | Residuos orgánicos | Volátiles | Plastificantes/ Almidón | Elastómeros/ PBAT | Negro de humo | Residuos inorgánicos |
| PBAT/S | 81.51 | 309.35 | 403.12 | - | 600 | 1.393 | 35.766 | 49.049 | - | 11.047 |
| G 10 % | 186.7 | 311.04 | 398.16 | 600 | 630 | 1.451 | 34.481 | 51.569 | 6.967 | 2.651 |
| G30 % | - | 313.34 | 382.25 | 600 | 620 | - | 31.084 | 46.491 | 11.97 | 8.434 |
| G 50 % | - | 313.71 | 376.27 | 600 | 620 | - | 21.428 | 35.964 | 25.084 | 14.664 |
| MG 10% | 176.49 | 313.97 | 396.79 | 600 | 620 | 1.207 | 34.797 | 50.092 | 8.237 | 2.704 |
| MG 30 % | - | 314.28 | 380.05 | 600 | 620 | - | 27.638 | 48.562 | 13.278 | 9.912 |
| MG 50 % | 141.77 | 316.34 | 380.25 | 600 | 620 | 1.24 | 18.064 | 41.257 | 21.67 | 16.446 |

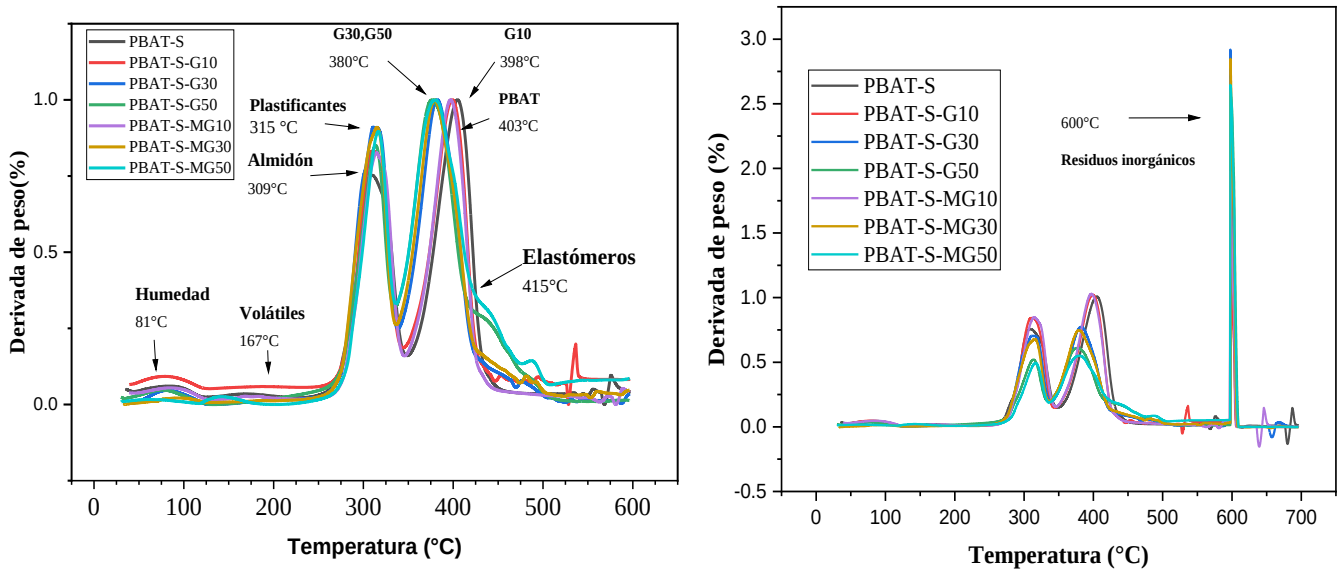



*Figura 4.7 Termogramas de compuestos de G/MG/PBAT/S. Creación propia C. Reyes, 2024*

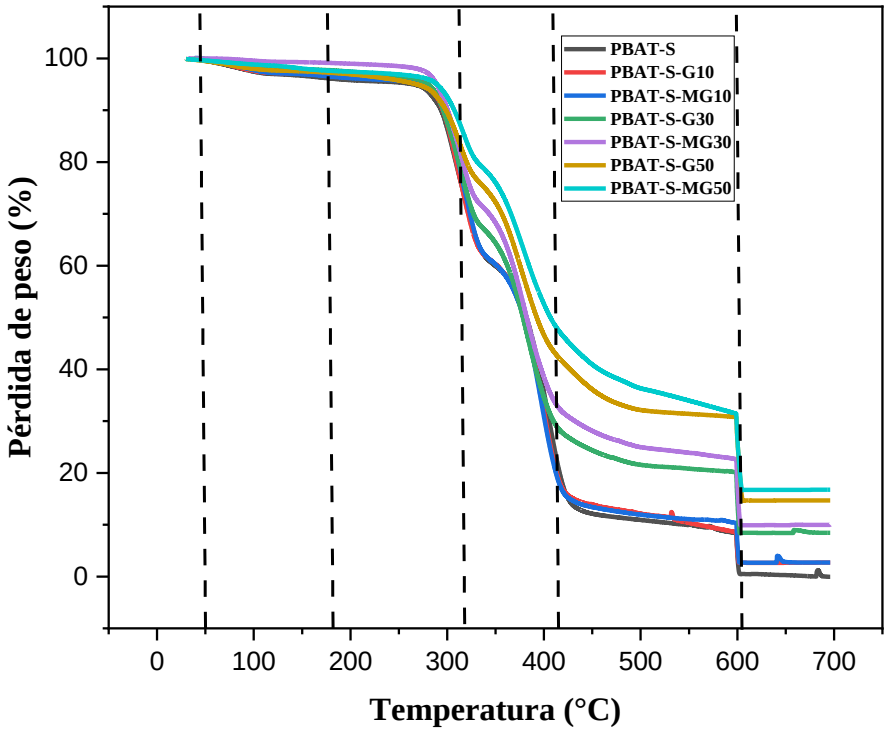



*Figura 4.8 Termograma de pérdida de peso de compuestos de G/MG/PBAT/S. Creación propia C. Reyes, 2024*

### 4.6.3. DMA

El análisis mecánico dinámico (DMA) puede proporcionar información sobre el módulo de almacenamiento (E'), el módulo de pérdida (E”), además de Tan Delta, en función de la temperatura, que son esenciales para comprender el comportamiento viscoelástico de los compuestos de PBAT/S/G/MG. Los módulos de pérdida y almacenamiento están relacionados con la máxima disipación de calor por unidad de deformación y la energía máxima que se puede almacenar en un período de tiempo que refleja el grado de elasticidad/rigidez (densidad de reticulación), respectivamente. El valor de Tan Delta es un indicativo de la capacidad de los compuestos de caucho para absorber y difundir energía. El PBAT/S mostro un valor de E' de 571 MPa mientras que los compuestos con G y MG disminuyeron el valor de E' a 492 (PBAT/S/G10), 464 (PBAT/S/MG10), 386 (PBAT/S/G30), 480 (PBAT/S/MG30), 310 (PBAT/S/G50) y 313 MPa (PBAT/S/MG50). Estos resultados (Figura 4.9) demuestran que los compuestos con polvo de llanta tienden a tener un menor módulo de almacenamiento inicial en comparación con el control (PBAT/S). De manera general al aumentar el contenido de polvo de llanta la rigidez de los compuestos disminuye, sin embargo, a excepción del MG al 10%, la modificación del polvo de llanta con acetona mejora ligeramente la rigidez de los compuestos en comparación con el G. Se omitieron las gráficas de Tan Delta y módulo de pérdida, debido a que la transición vítrea del PBAT y polvo de llanta se encuentran menores a 0°C.

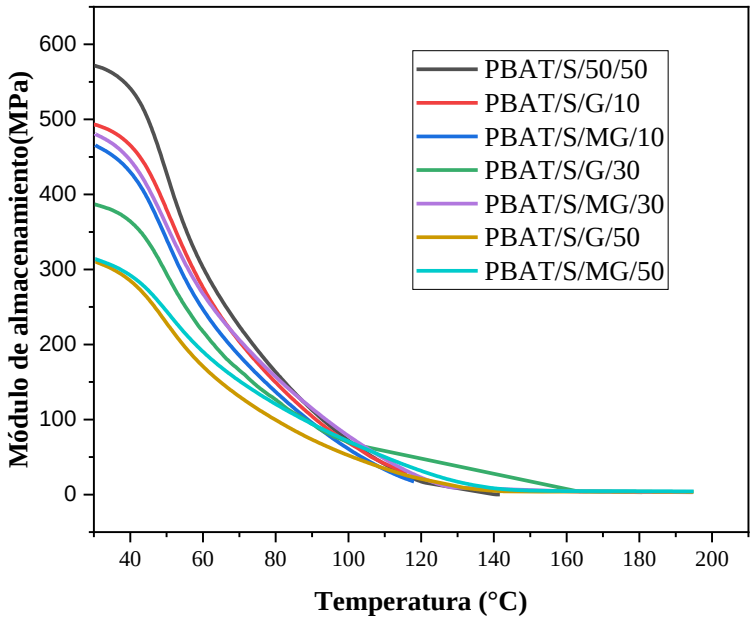



*Figura 4.9 Módulo de almacenamiento de compuestos con G/MG/PBAT/S. Creación propia C. Reyes, 2024*

### 4.6.4. Torque vs tiempo

En la Figura 4.10 se muestran las curvas de mezcla de torque- tiempo del control (PBAT/S), de los compuestos que contienen G y GM a concentraciones de 10%, 30% y 50 %. El control presenta un único pico de carga provocado por la fusión de cadenas poliméricas del PBAT (Sifuentes-Nieves et al.), al añadir polvo de llanta (G, MG) así como al incrementar la cantidad añadida se incrementa el nivel de torsión, esto indica que el polvo de llanta interfiere en el libre flujo de las cadenas poliméricas durante la mezcla, debido a que el aumento de la carga de polvo de llanta implica, un aumento de la viscosidad del compuesto (Sombatsompop & Kumnuantip, 2003) esto promueve una movilidad restringida de la matriz polimérica y la difícil dispersión de las partículas de caucho reticuladas(Fazli & Rodrigue, 2020b). Por otro lado, para el caso del MG a las mismas concentraciones del GTR sin modificar, muestra un notorio incremento en el grado de torque, este hecho es debido a que la eliminación de agentes plastificantes y aditivos promovido por el tratamiento por acetona generan moléculas de caucho más reactivas (Gámez et al., 2022), mejorando la adhesión interfacial con el PBAT, lo que podría ser reflejado en mejores propiedades mecánicas, las cuales serán discutidas en la siguiente sección.

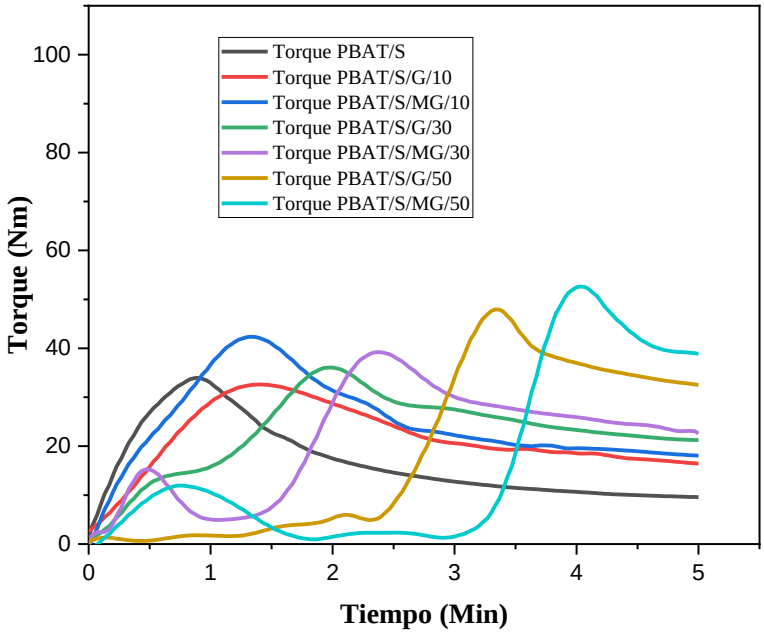



*Figura 4.10 Curvas de Torque- tiempo de las películas de G/MG/PBAT/S. Creación propia C. Reyes, 2024*

*Tabla 4.3 Energía específica y tiempo de fusión de las mezclas procesadas. Creación propia C. Reyes, 2024*

| Compuesto | Enegía específica (KNm/Kg) | Tiempo de fusión (Minutos) |
|---|---|---|
| PBAT/S/50/50 | 331.9 | 4 |
| PBAT/S/G/10 | 497.2 | 0.66 |
| PBAT/S/MG/10 | 560.7 | 0.46 |
| PBAT/S/G/30 | 569.3 | 0.93 |
| PBAT/S/MG/30 | 548.1 | 1.7 |
| PBAT/S/G/50 | 497.9 | 2.4 |
| PBAT/S/MG/50 | 416.2 | 3.23 |

La Tabla 4.3 presenta los parámetros de procesamiento como la energía requerida (energía específica) para fabricar las mezclas de PBAT/S/G/MG. La muestra control presenta una energía específica menor en comparación con los compuestos que contienen G y MG por lo tanto requiere un mayor tiempo de fusión. Por otro lado, al agregar el GTR (modificado o sin modificar) a la mezcla de PBAT/S se incrementa la energía especifica debido a un incremento en la viscosidad por efecto del polvo alcanzando sus valores máximos al 30% de concentración, probablemente porque a esta concentración se potencializan las interacciones entre las partículas con la matriz polimérica, para posteriormente disminuir probablemente debido a una alta aglomeración. Finalmente, el tiempo de fusión que involucra el valor del pico de carga hasta sus valores constantes, incremento conforme se agregó más concentración de G y MG ya que durante

el proceso de mezclado en fusión disminuyo la generación de calor entre los elementos giratorios de la cámara (Sifuentes-Nieves et al.) demandando así más tiempo de fusión.

### 4.6.5. Propiedades mecánicas

En la Figura 4.11 se muestra el comportamiento del módulo de tensión (MT), resistencia a la tensión (RT) y elongación máxima (EM), de los compuestos que contienen polvo de llanta sin modificar y polvo de llanta modificado.

En la Figura 4.11a puede apreciar de manera general, que el MT fue disminuyendo gradualmente mientras aumenta el porcentaje de polvo de llanta respecto a la muestra de referencia independientemente del tipo de polvo, estas caídas sustanciales están relacionadas con una baja adhesión interfacial, la aglomeración de las partículas de caucho (mostrados en análisis SEM) y la formación de huecos en la interfaz entre las fases de caucho y la matriz polimérica (Fazli & Rodrigue, 2020b), debido a una discrepancia en la polaridad , la adhesión interfacial es débil. Además, la presencia de negro de humo en la formulación del polvo de llanta actúa como un punto de concentración de tensiones que inhibe las orientaciones moleculares y la movilidad de las cadenas de caucho, lo que conduce a la falla del compuesto en MT más bajos (Fazli & Rodrigue, 2020a). Sin embargo, al comparar los compuestos con G y MG, el polvo modificado presenta un mayor MT a excepción de la concentración al 10%, esto se debe a que el tratamiento con acetona promovió una mejor dispersión y adhesión interfacial entre la matriz y las partículas del GM, esto demuestra que el MG presenta una distribución más uniforme en la matriz polimérica como se puede corroborar en los análisis SEM.

Respecto al comportamiento de las muestras en la prueba de resistencia a la tensión (Figura 4.11 b), se puede apreciar no hay una disminución drástica cuando se agrega el GTR, de hecho se registró un leve aumento del 5.5 % aproximadamente en la muestras que contienen el GTR modificado al 30 y 50 % respecto a las muestras con el mismo contenido de partículas sin modificar, este efecto podría estar atribuido a una mejor transferencia de los esfuerzos producto de un aumento en las compatibilidad de las partículas tratadas y mejor distribución de estas en la matriz polimérica (Gámez et al., 2022). Finalmente, la resistencia la elongación (Figura 4.11 c) también resulta en valores más altos para las muestras que contienen el GTR modificado (30 y 50%) en comparación con los compuestos con GTR sin modificar (30 y 50%) e incluso con la muestra de referencia, ya que al haber una mejor compatibilidad en estos compuestos, las partículas tratadas ceden parte de su naturaleza elástica a la matriz de PBAT.

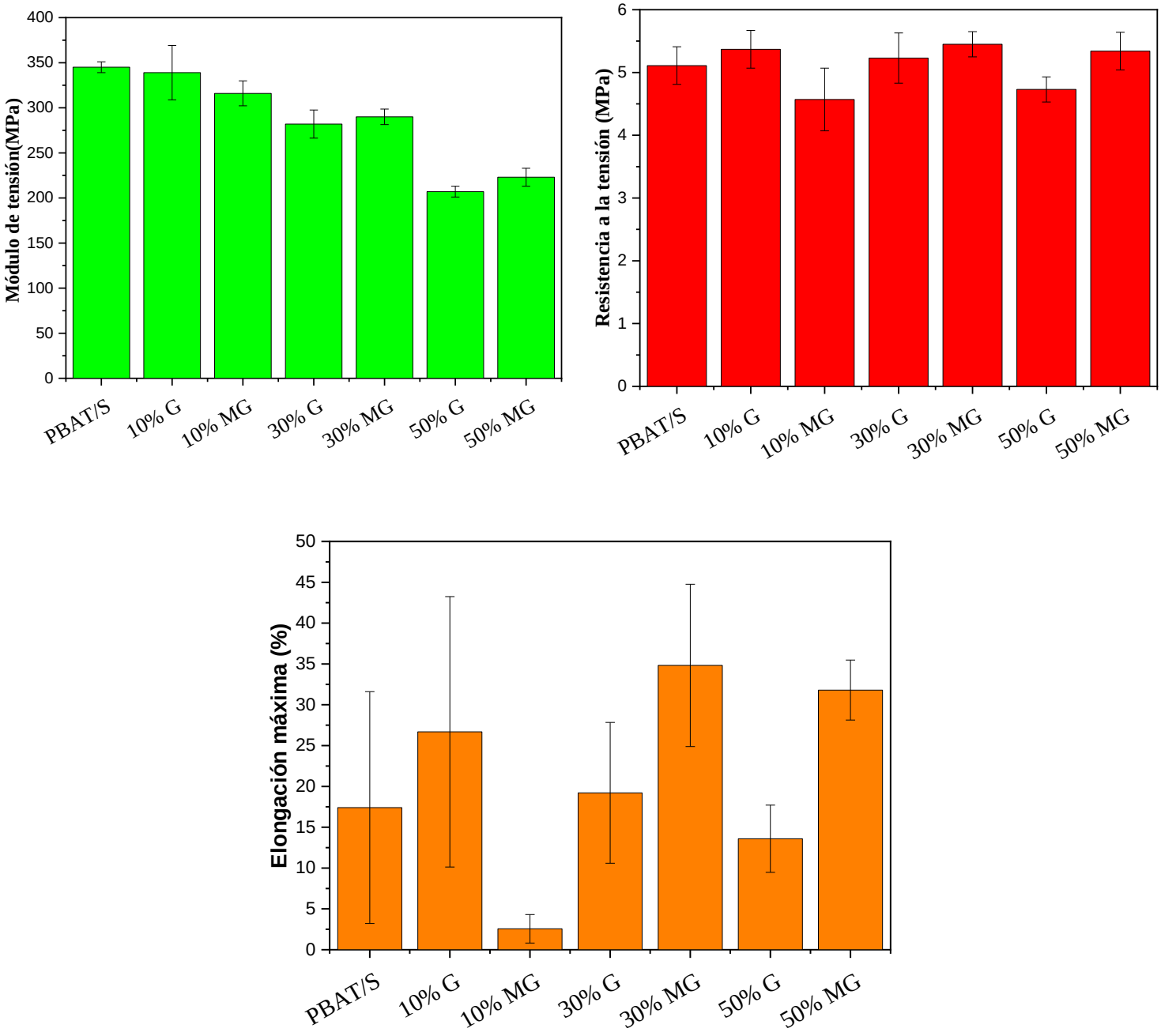



*Figura 4.11 Propiedades mecánicas de los compuestos. Creación propia C. Reyes, 2024*

### 4.6.6. SEM COMPUESTOS

Se realizó un análisis SEM a diversas magnificaciones para analizar la morfología de los compuestos que contienen PBAT/S como control, y las mezclas con G y MG a concentraciones de 10%, 30% y 50 %. En la muestra control (Figura 4.12a ) se pueden observar diversas áreas interfaciales separadas lo cual indica incompatibilidad entre el PBAT y el almidón, esto podría estar atribuido a los enlaces de hidrógeno entre los grupos hidroxilo del almidón y los grupos éster del PBAT (Xie et al., 2018). Además de los enlaces de hidrógeno, es posible que también ocurran interacciones de tipo Van der Waals entre las moléculas de PBAT y almidón. Estas interacciones débiles surgen debido a las fuerzas de dispersión y atracción entre las cadenas poliméricas, lo que podría contribuir a la cohesión del sistema, aunque de forma limitada. Las interacciones de Van der Waals suelen ser menos fuertes que los enlaces de hidrógeno , pero aún juegan un papel en la estabilización de la interfaz entre componentes incompatibles, particularmente cuando no hay una compatibilidad química fuerte entre los polímeros (Ishkhanyan & Krainov, 2021).

Las figuras 4.12 b), y 4.12 c), son imágenes SEM de la sección transversal de compuestos de PBAT/S/G10 y PBAT/S/MG10 respectivamente, se pueden observar estructuras filamentosas dispersas por la superficie, lo que indica la mezcla de los componentes del polvo de llanta con el PBAT y el almidón, aunque son notorias las fracturas, la mayoría de las partículas de almidón y polvo de llanta se desprenden directamente de la matriz del PBAT, aunque existen regiones donde se puede observar una mejor adhesión ente el MG y la matriz polimérica, respecto al compuesto con 10% de MG se destaca una figura cilíndrica en el centro de la imagen lo cual corresponde a fibras de acero o nailon provenientes del polvo de llanta.

Al aumentar el contenido de GTR por encima del 30% (Figura 4.12d y 4.12e) tanto para el polvo sin modificar y modificado, se aprecia una distribución de los componentes más heterogénea, también se muestran algunos aglomerados de partículas de G y MG. Es apreciable una mejor distribución de los compuestos en concentraciones del 30 % y 50 %, en las micrografías SEM, se observan áreas de adhesiones más homogéneas y cohesionadas entre las partículas de polvo y la matriz, lo que indica una mejor incrustación del polvo en la estructura del PBAT-S. La limpieza del polvo de llanta parece haber mejorado la interacción no solo con el PBAT, sino también con el almidón, como se puede observar en los recuadros rojos de la Figura 4.12g, en cambio en la Figura 4.12f se muestran menores zonas de adhesión y más brechas entre los gránulos del almidón debido a que se utilizó polvo no modificado. La función que presenta el PBAT en las mezclas, es como un copolímero, disminuye la tensión interfacial y promueve la interacción entre polímeros, actúa como un compatibilizador para controlar la morfología (estructura de fases) y la adhesión interfacial entre las fases para obtener un producto optimizado (Retsos et al., 2004).

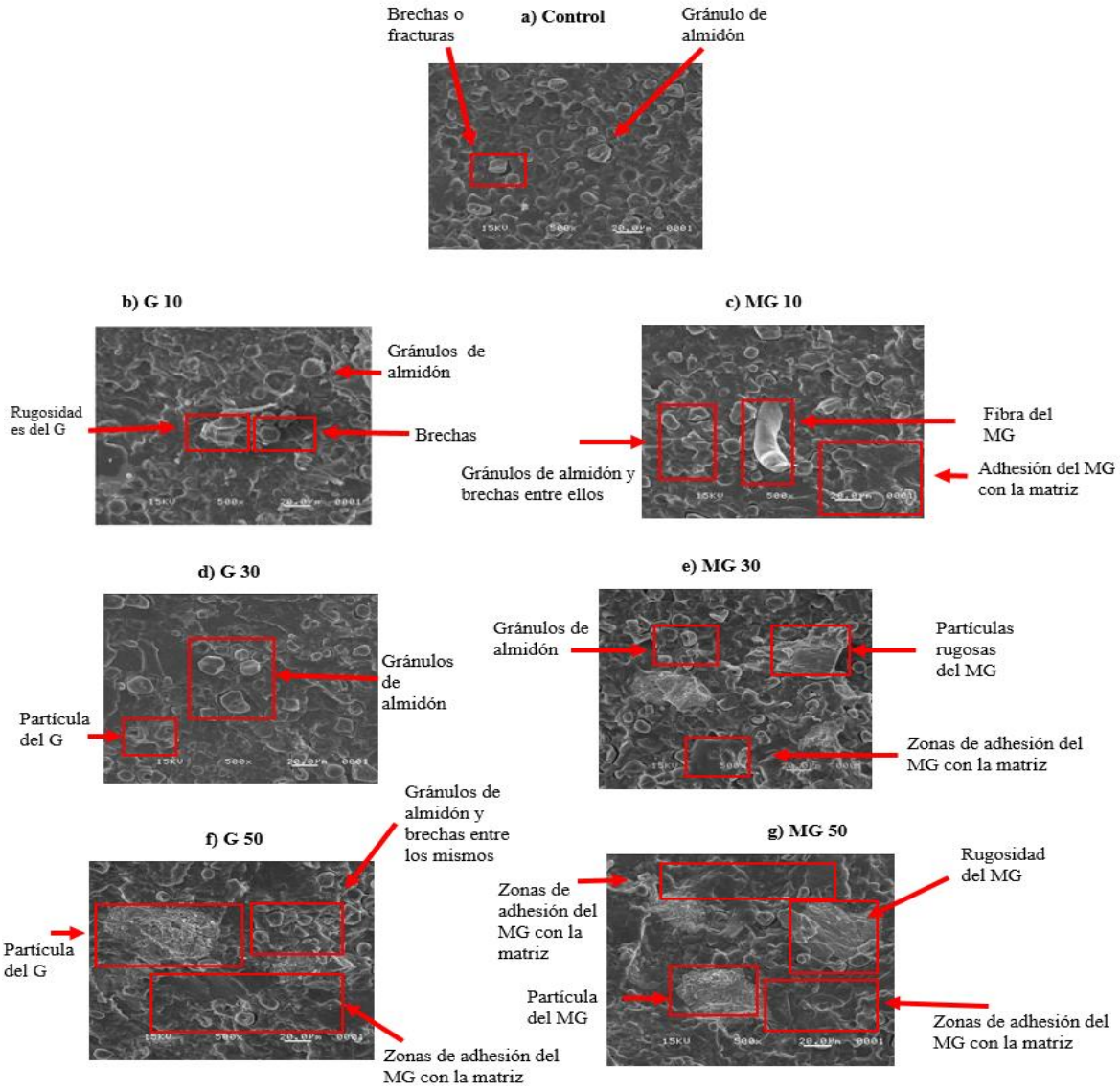



*Figura 4.12 Micrografia SEM de los compuestos. a) Control a 500 x b) G10 a 500 x c) MG10 a 500x d) G30 a 500x e)MG 30 a 500x f) G50 a 500x g)MG 50 a 500x. Creación propia C. Reyes, 2024*

# 5. CONCLUSIÓN

El sistema de extracción Soxhlet con acetona resultó un método eficiente para eliminar aditivos y modificar elastómeros del GTR, como lo indicó la disminución en la intensidad de las bandas de IR y Tmax relacionadas con plastificantes, aceites y caucho natural (NR) y caucho de estireno-butadieno (SBR). La adición del GTR modificado en diferentes concentraciones (10, 30 y 50 %) promovió un alto nivel de torque y energía durante el proceso de mezclado en estado fundido con PBAT/almidón, lo que indica que la eliminación parcial de aditivos del GTR permitió una mayor interacción molecular entre los componentes de la mezcla. Además, los compuestos de PBAT/almidón presentaron partículas de GTR tratado (MG) incrustadas en la matriz, debido a la interacción de los grupos carbonilo del PBAT y el almidón con el NR y el SBR. Asimismo, las partículas de GTR libres de aceite facilitaron su interacción con los grupos polares de las matrices poliméricas. Este comportamiento promovió un aumento en la resistencia a la tracción y el porcentaje de elongación (del 17,41 al 31,8 %) en los compuestos que contenían un 50 % de MG. Los resultados podrían ser de interés para quienes buscan agregar valor a los residuos de neumáticos y convertirlos en materias primas para reducir el costo del PBAT en las industrias de la movilidad y el embalaje.

# RECOMENDACIONES

**Caracterización Extensiva:** Ampliar la caracterización de los materiales compuestos. Incluir análisis adicionales como los rayos X (XRD) para determinar su estructura cristalina, y la espectroscopia de resonancia magnética nuclear (RMN) para investigar posibles cambios en la estructura química de los compuestos obtenidos.

**Análisis Mecánico y Térmico:** Incorporar pruebas adicionales para evaluar las propiedades mecánicas y térmicas de los compuestos. Realizar ensayos de fatiga y resistencia al impacto, además de los ya realizados. En términos térmicos, incluir análisis de conductividad térmica y expansión térmica para una comprensión más completa de las propiedades del material.

**Estudios de Biodegradabilidad:** Ampliar los estudios de biodegradabilidad, realizando pruebas en diferentes condiciones ambientales (aeróbicas y anaeróbicas) y durante períodos más prolongados. Evaluar la tasa de degradación del material compuesto y comparar los resultados con materiales de control (almidón puro y polvo de llanta sin modificar).

**Análisis de Ciclo de Vida (LCA):** Realizar un análisis más detallado del ciclo de vida (LCA) de los materiales desarrollados. Evaluar el impacto ambiental desde la obtención de las materias primas hasta la disposición final del producto. Considerar también los aspectos económicos del proceso de producción y su viabilidad comercial.

**Evaluación de Aplicaciones Prácticas:** Investigar y evaluar posibles aplicaciones prácticas para los materiales compuestos desarrollados. Explorar su uso en industrias específicas como la automotriz, la construcción o el embalaje. Realizar pruebas piloto en condiciones reales para verificar la eficacia y durabilidad del material en aplicaciones prácticas.

**Colaboraciones Multidisciplinarias:** Fomentar colaboraciones con otros departamentos o instituciones que trabajen en temas relacionados. Esto puede incluir áreas como ingeniería de materiales, y ciencias ambientales. Las colaboraciones pueden proporcionar nuevas perspectivas y técnicas que enriquezcan la investigación.

**Desarrollo de Prototipos:** Proponer el desarrollo de prototipos basados en los materiales estudiados. Crear productos concretos que puedan ser evaluados no solo en laboratorio, sino también en pruebas de campo. Esto ayudará a validar la aplicabilidad de los materiales y a identificar posibles mejoras necesarias antes de una producción a mayor escala

# BIBLIOGRAFÍA.


Adhikari, J., Das, A., Sinha, T., Saha, P., & Kim, J. K. (2018). Grinding of waste rubber.

Amari, T., Themelis, N. J., & Wernick, I. K. (1999). Resource recovery from used rubber tires. *Resources Policy*, *25*(3), 179-188.

Araujo-Morera, J., Hernández Santana, M., Verdejo, R., & López-Manchado, M. A. (2019). Giving a second opportunity to tire waste: An alternative path for the development of sustainable self-healing styrene–butadiene rubber compounds overcoming the magic triangle of tires. *Polymers*, *11*(12), 2122.

ASTM–D-297. (1993). Standard Test Methods for Rubber Products—Chemical Analysis.

Bockstal, L., Berchem, T., Schmetz, Q., & Richel, A. (2019). Devulcanisation and reclaiming of tires and rubber by physical and chemical processes: A review. *Journal of Cleaner Production*, *236*, 117574.

Boonprasertpoh, A., Pentrakoon, D., & Junkasem, J. (2020). Effect of PBAT on physical, morphological, and mechanical properties of PBS/PBAT foam. *Cellular Polymers*, *39*(1), 31-41.

Bordes, P., Pollet, E., & Avérous, L. (2009). Nano-biocomposites: biodegradable polyester/nanoclay systems. *Progress in polymer science*, *34*(2), 125-155.

Briassoulis, D. (2004). An overview on the mechanical behaviour of biodegradable agricultural films. *Journal of Polymers and the Environment*, *12*, 65-81.

Bulei, C., Todor, M., Heput, T., & Kiss, I. (2018). Directions for material recovery of used tires and their use in the production of new products intended for the industry of civil construction and pavements. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,

Cai, Z., Čadek, D., Jindrová, M., Kadeřábková, A., & Kuta, A. (2022). Physical properties and biodegradability evaluation of vulcanized epoxidized natural rubber/thermoplastic potato starch blends. *Materials*, *15*(21), 7478.

Christensen, T. H. (2011). Introduction to waste management. In *Solid waste technology and management* (pp. 3-16). Wiley.

Colom, X., Canavate, J., Carrillo, F., Velasco, J., Pagès, P., Mujal, R., & Nogués, F. (2006). Structural and mechanical studies on modified reused tyres composites. *European polymer journal*, *42*(10), 2369-2378.

Colom, X., Carrillo, F., & Canavate, J. (2007). Composites reinforced with reused tyres: Surface oxidant treatment to improve the interfacial compatibility. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *38*(1), 44-50.

Contreras Aguilar, A. (2013). Mejoramiento de mezclas asfálticas con grano de caucho reciclado (tesis de grado). *Veracruz: Universidad Veracruzana*.

Cunliffe, A., & Williams, P. (1998). Properties of chars and activated carbons derived from the pyrolysis of used tyres. *Environmental Technology*, *19*(12), 1177-1190.

Czarna-Juszkiewicz, D., Kunecki, P., Cader, J., & Wdowin, M. (2023). Review in Waste Tire Management—Potential Applications in Mitigating Environmental Pollution. *Materials*, *16*(17), 5771.

De Leon, A. C., Chen, Q., Palaganas, N. B., Palaganas, J. O., Manapat, J., & Advincula, R. C. (2016). High performance polymer nanocomposites for additive manufacturing applications. *Reactive and Functional Polymers*, *103*, 141-155.

Dierkes, W. (2005). Untreated and treated rubber powder. *Rubber recycling*, 127-154.

Dilara, P., & Briassoulis, D. (2000). Degradation and stabilization of low-density polyethylene films used as greenhouse covering materials. *Journal of Agricultural Engineering Research*, *76*(4), 309-321.

Dixit, S., Goel, R., Dubey, A., Shivhare, P. R., & Bhalavi, T. (2017). Natural fibre reinforced polymer composite materials-a review. *Polymers from renewable resources*, *8*(2), 71-78.

Fahrngruber, B., Siakkou, E., Wimmer, R., Kozich, M., & Mundigler, N. (2017). Malic acid: A novel processing aid for thermoplastic starch/poly (butylene adipate-co-terephthalate) compounding and blown film extrusion. *Journal of Applied polymer science*, *134*(48), 45539.

Fan, P., & Lu, C. (2011). A study on functionalization of waste tire rubber powder through ozonization. *Journal of Polymers and the Environment*, *19*, 943-949.

Fang, Y., Zhan, M., & Wang, Y. (2001). The status of recycling of waste rubber. *Materials & Design*, *22*(2), 123-128.

Fazli, A., & Rodrigue, D. (2020a). Recycling waste tires into ground tire rubber (GTR)/rubber compounds: a review. *Journal of Composites Science*, *4*(3), 103.

Fazli, A., & Rodrigue, D. (2020b). Waste rubber recycling: A review on the evolution and properties of thermoplastic elastomers. *Materials*, *13*(3), 782.

Gámez, J. F. H., Hernández, E. H., Martínez, D. I. S., Castillo, P. A. G., Nieves, I. S., Corral, F. S., Morones, P. G., Valdés, S. S., Rivera, J. G., & Velázquez, G. N. (2022). Microcellular ground tire rubber/ethylene vinyl acetate compounds: Mechanical properties and structure relationships. *Polymer Engineering & Science*, *62*(5), 1664-1676.

Gan, Z., Kuwabara, K., Yamamoto, M., Abe, H., & Doi, Y. (2004). Solid-state structures and thermal properties of aliphatic–aromatic poly (butylene adipate-co-butylene terephthalate) copolyesters. *Polymer degradation and stability*, *83*(2), 289-300.

Giray, E. S., & Sönmez, Ö. (2004). Supercritical extraction of scrap tire with different solvents and the effect of tire oil on the supercritical extraction of coal. *Fuel processing technology*, *85*(4), 251-265.

Gönen, M., Balköse, D., İnal, F., & Ülkü, S. (2008). The effect of zinc stearate on thermal degradation of paraffin wax. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, *94*(3), 737-742.

Guigard, S. E., Gee, K., Zhang, L., Atkinson, J. D., & Hashisho, Z. (2014). Automotive wastes. *Water Environment Research*, *86*(10), 1416-1446.

Heidary, S., & Gordon, B. (1994). Hydrolyzable poly (ethylene terephthalate). *Journal of environmental polymer degradation*, *2*, 19-26.
Hejna, A., Korol, J., Przybysz-Romatowska, M., Zedler, Ł., Chmielnicki, B., & Formela, K. (2020). Waste tire rubber as low-cost and environmentally-friendly modifier in thermoset polymers–A review. *Waste management*, *108*, 106-118.
Hirayama, D., & Saron, C. (2012). Chemical modifications in styrene–butadiene rubber after microwave devulcanization. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, *51*(10), 3975-3980.
Holst, O., Stenberg, B., & Christiansson, M. (1998). Biotechnological possibilities for waste tyre-rubber treatment. *Biodegradation*, *9*, 301-310.
Isayev, A. I., Liang, T., & Lewis, T. M. (2014). Effect of particle size on ultrasonic devulcanization of tire rubber in twin-screw extruder. *Rubber Chemistry and Technology*, *87*(1), 86-102.
Ishkhanyan, A., & Krainov, V. (2021). Van der Waals attraction of hydrogen atoms. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, *132*(6), 892-896.
Jana, G., & Das, C. (2005). Recycling natural rubber vulcanizates through mechanochemical devulcanization. *Macromolecular research*, *13*, 30-38.
Jana, G. K., Mahaling, R. N., Rath, T., Kozłowska, A., Kozłowski, M., & Das, C. K. (2007). Mechano-chemical recycling of sulfur cured natural rubber. *Polimery*, *52*(2), 131-136.
Jian, J., Xiangbin, Z., & Xianbo, H. (2020). An overview on synthesis, properties and applications of poly (butylene-adipate-co-terephthalate)–PBAT. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, *3*(1), 19-26.
Joung, S. N., Park, S. W., Kim, S. Y., Yoo, K.-P., & Bae, S. Y. (2001). Oil recovery from scrap tires by low-temperature supercritical decomposition with toluene and cyclohexane. *Journal of chemical engineering of Japan*, *34*(2), 132-137.
Kakroodi, A. R., & Rodrigue, D. (2013). Highly filled thermoplastic elastomers from ground tire rubber, maleated polyethylene and high density polyethylene. *Plastics, rubber and composites*, *42*(3), 115-122.
Kaloush, K., & Biligiri, K. (2011). Asphalt-Rubber Standard Practice Guide. *Links: West Devon, UK*.
Kandah, M., Al-Otoom, A., Al-Harahsheh, M., Al-Zoubi, R. M., & Al-Harahsheh, A. (2017). Extracting oil from used auto tires at low temperature after chemical treatment. *Waste management*, *61*, 307-314.
Karger-Kocsis, J., Mészáros, L., & Bárány, T. (2013). Ground tyre rubber (GTR) in thermoplastics, thermosets, and rubbers. *Journal of Materials Science*, *48*, 1-38.
Kawabata, N., Okuyama, B. I., & Yamashita, S. (1981). Reclamation of vulcanized rubber by chemical degradation. XV. Degradation of vulcanized synthetic isoprene by the phenylhydrazine–iron (II) chloride system. *Journal of Applied polymer science*, *26*(4), 1417-1419.
Kershaw, J. R. (1998). Supercritical fluid extraction of scrap tyres. *Fuel*, *77*(9-10), 1113-1115.
Khan, M. M. R., Tsukada, M., Gotoh, Y., Morikawa, H., Freddi, G., & Shiozaki, H. (2010). Physical properties and dyeability of silk fibers degummed with citric acid. *Bioresource technology*, *101*(21), 8439-8445.
Kim, J., Ryu, S., & Chang, Y. (2000). Mechanical and dynamic mechanical properties of waste rubber powder/HDPE composite. *Journal of Applied polymer science*, *77*(12), 2595-2602.
Kim, K.-N., & Le, T. H. M. (2023). Durability of polymer-modified asphalt mixture with wasted tire powder and epoxy resin under tropical climate curing conditions. *Polymers*, *15*(11), 2504.
Lapkovskis, V., Mironovs, V., Kasperovich, A., Myadelets, V., & Goljandin, D. (2020). Crumb rubber as a secondary raw material from waste rubber: A short review of end-of-life mechanical processing methods. *Recycling*, *5*(4), 32.
Lee, S. H., Lim, S. W., & Lee, K. H. (1999). Properties of potentially biodegradable copolyesters of (succinic acid–1, 4-butanediol)/(dimethyl terephthalate–1, 4-butanediol). *Polymer international*, *48*(9), 861-867.
Liu, Y., Xu, Y., Yan, Y., Hu, D., Yang, L., & Shen, R. (2015). Application of Raman spectroscopy in structure analysis and crystallinity calculation of corn starch. *Starch-Stärke*, *67*(7-8), 612-619.
Mangili, I., Collina, E., Anzano, M., Pitea, D., & Lasagni, M. (2014). Characterization and supercritical CO2 devulcanization of cryo-ground tire rubber: Influence of devulcanization process on reclaimed material. *Polymer degradation and stability*, *102*, 15-24.
Merriman, S., Chandra, D., Borowczak, M., Dhinojwala, A., & Benko, D. (2022). Simultaneous determination of additive concentration in rubber using ATR-FTIR spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, *281*, 121614.
Müller, R.-J., Kleeberg, I., & Deckwer, W.-D. (2001). Biodegradation of polyesters containing aromatic constituents. *Journal of biotechnology*, *86*(2), 87-95.
Nakason, C., Kaesaman, A., & Supasanthitikul, P. (2004). The grafting of maleic anhydride onto natural rubber. *Polymer Testing*, *23*(1), 35-41.
Okada, M. (2002). Chemical syntheses of biodegradable polymers. *Progress in polymer science*, *27*(1), 87-133.
Oliveira, T. A., Oliveira, R. R., Barbosa, R., Azevedo, J. B., & Alves, T. S. (2017). Effect of reprocessing cycles on the degradation of PP/PBAT-thermoplastic starch blends. *Carbohydrate Polymers*, *168*, 52-60.
Park, S., & Gloyna, E. F. (1997). Statistical study of the liquefaction of used rubber tyre in supercritical water. *Fuel*, *76*(11), 999-1003.
Pathak, P., & Sinha, S. (2021). Valorisation of waste tires into fuel and energy. In *Advanced Technology for the Conversion of Waste Into Fuels and Chemicals* (pp. 109-122). Elsevier.
Phasuphan, W., Praphairaksit, N., & Imyim, A. (2019). Removal of ibuprofen, diclofenac, and naproxen from water using chitosan-modified waste tire crumb rubber. *Journal of Molecular Liquids*, *294*, 111554.

Pokorný, J., Šál, J., & Ševčík, R. (2022). Waste tires and their material recycling. AIP Conference Proceedings,
Pozo, C., Rodríguez-Llamazares, S., Bouza, R., Barral, L., Castaño, J., Müller, N., & Restrepo, I. (2018). Study of the structural order of native starch granules using combined FTIR and XRD analysis. *Journal of Polymer Research*, *25*, 1-8.
Ramarad, S., Khalid, M., Ratnam, C., Chuah, A. L., & Rashmi, W. (2015). Waste tire rubber in polymer blends: A review on the evolution, properties and future. *Progress in Materials Science*, *72*, 100-140.
Ramírez Palma, N. I. (2006). Estudio de la utilización de caucho de neumáticos en mezclas asfálticas en caliente mediante proceso seco.
Retsos, H., Anastasiadis, S., Pispas, S., Mays, J., & Hadjichristidis, N. (2004). Interfacial tension in binary polymer blends in the presence of block copolymers. 2. Effects of additive architecture and composition. *Macromolecules*, *37*(2), 524-537.
Rius-Alonso, C., Olivares-Lachica, L., Gallard-Paz, D., Hernandez-Delgado, R., Diaz-Merito, G., Rueda-Alatorre, M., & Gonzalez-Quezada, Y. (2011). Thermal and microwave pyrolysis of tires to produce fuel. EDULEARN11 Proceedings,
Rodríguez Castro, E. (2016). Uso de polvo de caucho de llantas en pavimentos asfálticos.
Rowhani, A., & Rainey, T. J. (2016). Scrap tyre management pathways and their use as a fuel—a review. *Energies*, *9*(11), 888.
Ruwona, W., Danha, G., & Muzenda, E. (2019). A review on material and energy recovery from waste tyres. *Procedia Manufacturing*, *35*, 216-222.
Sanches, N. B., Navarro, S., Diniz, M. F., & Dutra, R. d. C. L. (2014). Characterization of additives typically employed in EPDM formulations by using FT-IR of gaseous pyrolyzates. *Polímeros*, *24*, 269-275.
Sandhu, K. S., & Singh, N. (2007). Some properties of corn starches II: Physicochemical, gelatinization, retrogradation, pasting and gel textural properties. *Food chemistry*, *101*(4), 1499-1507.
Saputra, R., Walvekar, R., Khalid, M., Mubarak, N. M., & Sillanpää, M. (2021). Current progress in waste tire rubber devulcanization. *Chemosphere*, *265*, 129033.
Sathiskumar, C., & Karthikeyan, S. (2019). Recycling of waste tires and its energy storage application of by-products–a review. *Sustainable Materials and Technologies*, *22*, e00125.
Shaker, R., & Rodrigue, D. (2019). Rotomolding of thermoplastic elastomers based on low-density polyethylene and recycled natural rubber. *Applied Sciences*, *9*(24), 5430.
Shu, X., & Huang, B. (2014). Recycling of waste tire rubber in asphalt and portland cement concrete: An overview. *Construction and Building Materials*, *67*, 217-224.
Sifuentes-Nieves, I., Hernandez-Gamez, J. F., Salinas-Hernández, M., Garcia-Hernandez, Z., Herrera-Guerrero, A., Hernandez-Hernandez, E., & Flores-Silva, P. C. Biopolymer composites based on ultrasound/plasma-modified fiber waste and polybutylene adipate terephthalate (PBAT): Physicochemical and functional performance. *Polymer Composites*.
Sombatsompop, N., & Kumnuantip, C. (2003). Rheology, cure characteristics, physical and mechanical properties of tire tread reclaimed rubber/natural rubber compounds. *Journal of Applied polymer science*, *87*(10), 1723-1731.
Sommer, F., Dietze, V., Baum, A., Sauer, J., Gilge, S., Maschowski, C., & Gieré, R. (2018). Tire abrasion as a major source of microplastics in the environment. *Aerosol and air quality research*, *18*(8), 2014-2028.
Sonnier, R., Leroy, E., Clerc, L., Bergeret, A., & Lopez-Cuesta, J. (2007). Polyethylene/ground tyre rubber blends: Influence of particle morphology and oxidation on mechanical properties. *Polymer Testing*, *26*(2), 274-281.
Spiridon, I., Anghel, N. C., Darie-Nita, R. N., Iwańczuk, A., Ursu, R. G., & Spiridon, I. A. (2020). New composites based on starch/Ecoflex®/biomass wastes: Mechanical, thermal, morphological and antimicrobial properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, *156*, 1435-1444.
Thomas, D., & Atwell, W. (1999). Starch modifications. *Starches*, 31-40.
Thomas, J., Moosavian, S. K., Cutright, T., Pugh, C., & Soucek, M. D. (2022). Method development for separation and analysis of tire and road wear particles from roadside soil samples. *Environmental Science & Technology*, *56*(17), 11910-11921.
Tokiwa, Y., & Suzuki, T. (1981). Hydrolysis of copolyesters containing aromatic and aliphatic ester blocks by lipase. *Journal of Applied polymer science*, *26*(2), 441-448.
Waisarikit, A., Ross, S., Ross, G. M., & Mahasaranon, S. (2023). The influence of cassava starch on the properties of PLA/PBS/SCG films for packaging applications. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, *62*(13), 1684-1695.
Wang, X., Shi, C., Zhang, L., & Zhang, Y. (2013). Effects of shear stress and subcritical water on devulcanization of styrene–butadiene rubber based ground tire rubber in a twin-screw extruder. *Journal of Applied polymer science*, *130*(3), 1845-1854.
Wang, Y.-H., Chen, Y.-K., & Rodrigue, D. (2018). Production of thermoplastic elastomers based on recycled PE and ground tire rubber: Morphology, mechanical properties and effect of compatibilizer addition. *International Polymer Processing*, *33*(4), 525-534.
Whistler, R. L., BeMiller, J. N., & Paschall, E. F. (2012). *Starch: chemistry and technology*. Academic Press.
Witt, U., Einig, T., Yamamoto, M., Kleeberg, I., Deckwer, W.-D., & Müller, R.-J. (2001). Biodegradation of aliphatic–aromatic copolyesters: evaluation of the final biodegradability and ecotoxicological impact of degradation intermediates. *Chemosphere*, *44*(2), 289-299.
Witt, U., Müller, R.-J., & Deckwer, W.-D. (1996). Evaluation of the biodegradability of copolyesters containing aromatic compounds by investigations of model oligomers. *Journal of environmental polymer degradation*, *4*, 9-20.
Witt, U., Muller, R., & Deckwer, W. (1995). Biodegradable Polyester Copolymers with Adaptable Application Properties Based on Mass Chemical-Products. *Chemie Ingenieur Technik*, *67*(7), 904-907.
Xie, Y., Zhang, J., Hu, J., Zhang, A., & Zhou, T. (2018). Design and preparation of rapid full bio-degradable plastic composites based on poly (butylene succinate). *Polymer Composites*, *39*, E609-E619.

Xu, M., Yan, X., Li, F., Xiao, Y., Li, J., Liu, Z., He, H., Li, Y., & Zhu, Z. (2023). Fabrication high toughness poly (butylene adipate-co-terephthalate)/thermoplastic starch composites via melt compounding with ethylene-methyl acrylate-glycidyl methacrylate. *International Journal of Biological Macromolecules*, *250*, 126446.

Yehia, A., Mull, M., Ismail, M., Hefny, Y., & Abdel-Bary, E. (2004). Effect of chemically modified waste rubber powder as a filler in natural rubber vulcanizates. *Journal of Applied polymer science*, *93*(1), 30-36.

Yikmis, M., & Steinbüchel, A. (2012). Historical and recent achievements in the field of microbial degradation of natural and synthetic rubber. *Applied and Environmental Microbiology*, *78*(13), 4543-4551.

Youssef, A. M., Assem, F. M., Abdel-Aziz, M. E., Elaaser, M., Ibrahim, O. A., Mahmoud, M., & Abd El-Salam, M. H. (2019). Development of bionanocomposite materials and its use in coating of Ras cheese. *Food chemistry*, *270*, 467-475.

Zanchet, A., Carli, L., Giovanela, M., Brandalise, R., & Crespo, J. (2012). Use of styrene butadiene rubber industrial waste devulcanized by microwave in rubber composites for automotive application. *Materials & Design*, *39*, 437-443.

Zhang, S., He, Y., Yin, Y., & Jiang, G. (2019). Fabrication of innovative thermoplastic starch bio-elastomer to achieve high toughness poly (butylene succinate) composites. *Carbohydrate Polymers*, *206*, 827-836.

Zhorina, L., Kuznetsova, O., Rogovina, S., Vladimirov, L., Grachev, A., Prut, E., & Berlin, A. (2018). Structure and properties of crumb rubber–starch composites. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, *12*, 1076-1081.

# ANEXO.

Anexo 1. Carta de autorización. Fuente: CIQA, 2024

GOBIERNO DE MÉXICO | CONAHCYT CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS | CIQA CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

Saltillo, Coah. a 12 de febrero del 2024

**Asunto:** Carta de autorización para realizar Residencia Profesional en el CIQA

**MTA. ELSA FABIOLA PÉREZ CERÓN**
Jefa de la División de estudios Profesionales
del Instituto Tecnológico de Pachuca

**PRESENTE:**

Por medio de la presente manifiesto que el estudiante de la carrera de Ingeniería química del Instituto Tecnológico de Pachuca (ITP) **CESAR AUGUSTO REYES BAUTISTA**, con número de control 18201029, está autorizado para realizar su Residencia Profesional en el Departamento de materiales avanzados y Procesos de transformación de plásticos del Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA) y asignada al Dr. José Francisco Hernández Gámez y el Dr. Israel Sifuentes Nieves como asesores. El título del trabajo a desarrollar es "Propiedades fisicoquímicas y funcionales de compuestos sustentables base almidón y polvo de llanta modificado". El estudiante estará realizando su residencia profesional en el periodo del 19 de febrero y hasta el 21 de junio del 2024 cubriendo un total de 500 h.

Sin otro particular que tratar por el momento, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo y quedo ante usted para cualquier aclaración.

ATENTAMENTE

CENTRO DE INVESTIGACION EN QUIMICA APLICADA

**Lic. BLANCA CECILIA CONTRERAS TORRES**
**Jefa del Depto. De Recursos Humanos**
**Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA)**

Blvd. Enrique Reyna Hermosillo No. 140, San Jose de los Cerritos, CP. 25294, Saltillo, Coah., México.
Tel: (844) 438 9830 www.ciqa.mx

2024 Felipe Carrillo PUERTO