

**Universidad del Papaloapan  
Campus Tuxtepec**

---

---

**Licenciatura en Ciencias Químicas**

# **TESIS**

**Degradación química del PET usando  
montmorillonita (K5 y K30) como catalizador e  
incorporación de los productos de degradación  
en una matriz polimérica de almidón.**

**Para obtener el título de:**

**LICENCIADO EN CIENCIAS QUÍMICAS**

**Presenta:**

**Kelvin Valentín Gómez Ramírez**

**Director**

**Dr. Aurelio Ramírez Hernández**

**San Juan Bautista Tuxtepec, Oaxaca 2024**





# Universidad del Papaloapan

San Juan Bautista Tuxtepec, Oaxaca a 04 de junio del 2024

UNPA/LCQ/128/2024

**Asunto:** Autorización de impresión de tesis

**M.E. Yesenia Barrientos Arenal**  
**Jefa de Servicios Escolares**  
**Universidad del Papaloapan**  
**P R E S E N T E**

Con base en el dictamen de la comisión revisora, se autoriza la impresión del trabajo de tesis presentado por el egresado de la Licenciatura en Ciencias Químicas KELVIN VALENTIN GOMEZ RAMIREZ (Matrícula 16060020) y que lleva por título "Degradación química del PET usando montmorillonita (K5 y K30) como catalizador e incorporación de los productos de degradación en una matriz polimérica de almidón" para su presentación y defensa por parte de la egresada y así obtener el título de Licenciada en Ciencias Químicas, toda vez que cumple satisfactoriamente con la reglamentación establecida para tal fin.

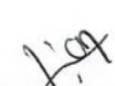
Sin otro asunto en particular me despido cordialmente agradeciendo la atención a la presente.

**Atentamente**

*terra uberrima, mens aperta*

*Bou Lo-tama, chi ji jú*

  
**Dr. Jorge Carlos Conde Acevedo**  
**Jefe de Carrera**  
**Lic. en Ciencias Químicas**  
  
**LICENCIATURA EN CIENCIAS QUÍMICAS**  
**CAMPUS TUXTEPEC**

  
**Vo.Bo. M.C. Héctor López Arjona**  
**Vicerrector Académico**  
**Universidad del Papaloapan**

  
**UNPA**  
*terra uberrima, mens aperta*  
*Bou Lo-tama, chi ji jú*  
**VICE-RECTORIA ACADEMICA**

C.c.p. Dr. Aurelio Ramírez Hernández. Director de tesis. Para su conocimiento.  
C.c.p. Kelvin Valentín Gómez Ramírez. Tesisista egresado. Para su conocimiento  
C.c.p. Archivo

**OAXACA**

Campus Loma Bonita  
Av. Ferrocarril S/N, Col. Ciudad Universitaria, Loma Bonita, Oaxaca C.P. 68400  
Tel/Fax: 01 281 872 92 30

[www.unpa.edu.mx](http://www.unpa.edu.mx)

Campus Tuxtepec  
Circuito Central N° 200, Col. Parque Industrial C.P. 68301  
Tel/Fax: 01 281 874 5240



# Universidad del Papaloapan

San Juan Bautista Tuxtepec, Oaxaca a 04 de junio del 2024

UNPA/LCQ/127/2024

**Asunto:** Designación de sinodales

**C. Kelvin Valentin Gómez Ramírez**  
**Pasante de la carrera de Licenciatura en Ciencias Químicas**  
**P R E S E N T E**

Por este medio le informo la propuesta de la jefatura de carrera de los profesores investigadores que fungirán como sinodales en el examen de defensa de tesis para obtener el título de Licenciada en Ciencias Químicas.

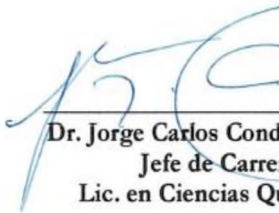

El jurado del examen profesional estará compuesto por los siguientes profesores investigadores:

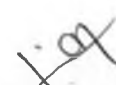

Presidente: Dr. Jorge Carlos Conde Acevedo  
Secretario: Dr. Miguel Ángel García Muñoz  
Vocal: Dr. Aurelio Ramírez Hernández  
Primer Suplente: Dr. Francisco Noé Mendoza Ambrosio  
Segundo Suplente: Dr. Paúl Mauricio Sánchez Ocampo

Sin otro asunto en particular me despido cordialmente agradeciendo la atención a la presente.

**Atentamente**

*terra uberrima, mens aperta*  
*Bon Tso-tama, chi ji ju*

  
  
**Dr. Jorge Carlos Conde Acevedo**  
**Jefe de Carrera**  
**Lic. en Ciencias Químicas**

  
  
**Vo.Bo. M.C. Héctor López Arjona**  
**Vicerrector Académico**  
**Universidad del Papaloapan**  
**VICE-RECTORIA ACADEMICA**

C.c.p. Dr. Aurelio Ramírez Hernández, Director de tesis. Para su conocimiento.  
C.c.p. Kelvin Valentin Gómez Ramírez. Tesista egresado. Para su conocimiento  
C.c.p. Archivo

## **Dedicatoria**

Este trabajo va dedicado con todo el cariño y aprecio para aquellos seres humanos que estuvieron en mis momentos buenos y malos, que me permitieron culminar las actividades con éxito. Es grato reconocer en especial a mis padres Valentín y Elizabeth, a Emmanuel mi pareja y mis abuelos por su amor incondicional, su constante apoyo y sus sacrificios incansables a lo largo de este viaje. Su fe en mí ha sido mi mayor fortaleza y motivación. ¡GRACIAS!

Y dedico esta frase química para aquellas personas que siempre se cuestionan de lo que sucede a su alrededor:

*Si la vida la entiendes bajo los conceptos más simples de la química, sabrás que es tan bonita pero compleja y perfecta a la vez, que podrás entender el ¿por qué? de muchas cosas*

- **Kelvin Valentín Gómez Ramírez**

## **Agradecimientos**

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que han contribuido de manera significativa a la realización de este trabajo de investigación. En primer lugar, quiero agradecer a mi director de tesis, el Dr. Aurelio Ramírez Hernández , por su orientación experta, sus valiosos comentarios y su constante apoyo a lo largo de este proyecto. Su sabiduría y dedicación fueron fundamentales para alcanzar los objetivos planteados.

Agradezco también a todos los profesores y académicos del departamento de Química Aplicada por su inspiración, su enseñanza y su disposición para discutir ideas y proporcionar retroalimentación constructiva.

Mi profundo agradecimiento va dirigido a mí y a mis padres, por no haber bajado la guardia en tiempos difíciles.

Quiero expresar mi gratitud UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN, por brindarme la oportunidad de realizar esta investigación a través de sus prestigiadas instalaciones. Su generosidad y respaldo financiero y académico fueron esenciales para llevar a cabo este proyecto.

Por último, pero no menos importante, agradezco a todas las personas que participaron en este estudio, ya sea como colaboradores, entrevistados o sujetos de investigación. Su participación fue fundamental para obtener los datos y las conclusiones presentadas en esta tesis.

A todos ellos, gracias de corazón por formar parte de este importante capítulo de mi vida académica.

## Índice

a) Abreviaturas _____	7
b) Índice de figuras _____	8
c) Índice de tablas _____	9
d) Índice de graficas _____	10
1. Introducción _____	13
2. Marco teórico _____	14
2.1 Breve historia de los polímeros y su tendencia nacional _____	14
2.2 Polietilen Tereftalato (PET) _____	15
2.3 Síntesis del PET _____	16
2.4 Propiedades físicas y químicas del PET _____	18
2.5 Análisis estructural del PET _____	19
2.6 Aplicaciones del PET _____	19
2.7 Producción anual del PET versus otros polímeros _____	21
2.8 Impacto ambiental del PET _____	23
2.9 Reciclaje del PET _____	25
2.10 Tipos de degradación de polímeros _____	26
2.11 Productos de la degradación química del PET _____	29
2.12 Arcillas _____	30
2.13 Formula y estructura de las arcillas _____	32
2.14 Propiedades fisicoquímicas de las arcillas _____	33
2.15 Almidón _____	33

2.16 Propiedades fisicoquímicas del almidón _____	35
2.17 Almidón de plátano _____	36
2.18 Películas de almidón _____	38
3. Antecedentes _____	39
4. Planteamiento del problema _____	41
5. Justificación _____	42
6. Hipótesis _____	43
7. Objetivo _____	44
7.1 General _____	44
7.2 Específicos _____	44
8. Desarrollo experimental _____	45
8.1 Degradación química del PET utilizando arcillas montmorillonitas K5 y K30 como catalizador _____	46
8.2 Incorporación del producto degradado del PET al almidón de plátano, formación de películas. _____	47
8.3 Caracterización del PET degradado y las películas de almidón modificado _____	50
8.4 Pruebas mecánicas de las películas de almidón modificado _____	50
8.5 Pruebas de humedad las películas de almidón modificado _____	51
9. Resultados y discusión _____	52
9.1 Degradación del PET usando arcilla de montmorillonita K5 y K30 a diferentes temperaturas y relaciones de masa _____	52
9.2 Analisis por FTIR y RMN de los productos de degradación del PET usando arcilla de montmorillonita K5 y K30 como catalizadores _____	53

9.3 Mecanismo de la degradación del PET usando las arcillas K5 y K30_	58
9.4 Análisis de IR de las películas PETd/Almidón de plátano macho _____	59
9.5 Análisis de las pruebas mecánicas y determinación de humedad de las películas PETd/Almidón de plátano macho_____	61
10. Conclusión _____	67
11. Perspectivas _____	68
12. Bibliografía _____	69

## **Abreviaturas**

ANP: Almidón nativo de plátano

C/R: Con reciclaje

EC: Etilen Carbonato

KOH: Hidróxido de potasio

MMT: Montmorillonita

O: Octaédricas

PD: Producto de degradación

PET: Polietilen tereftalato

rPET: Polietilen tereftalato reciclado

S/R: Sin reciclaje

T: Tetraédricas

vPET: Polietilen tereftalato virgen

PANP-100: Película de almidón nativo de plátano al 100%

P1APETd(K5)-5: Película 1 de almidón modificado con PET degradado/K5 -5

P2APETd(K5)-7: Película 2 de almidón modificado con PET degradado/K5 -7

P3APETd(K5)-10: Película 3 de almidón modificado con PET degradado/K5 -10

P1APETd(K30)-5: Película 1 de almidón modificado con PET degradado/K30 -5

P2APETd(K30)-7: Película 2 de almidón modificado con PET degradado/K30 -7

P3APETd(K30)-10: Película 3 de almidón modificado con PET degradado/K30 -10

## Índice de figuras

**Figura 1.** Polímeros sintéticos comerciales

**Figura 2.** Estructura del PET Polietilen tereftalato

**Figura 3.** Síntesis del PET

**Figura 4.** Estructura del PET

**Figura 5.** Impacto de la producción de plásticos para 2050.

**Figura 6.** Transiciones (A) de primer orden y de segundo orden (B)

**Figura 7.** Degradación alcalina del PET.

**Figura 8.** Estructura química de la arcilla tipo esmectita, montmorillonita.

**Figura 9.** Estructura de los componentes del almidón, amilopectina y amilosa.

**Figura 10.** (a) Plátano macho (b) micrografía electrónica de barrido del almidón de plátano macho.

**Figura 11.** A) Elaboración de las películas por el método de casting, B) Secado de las películas formadas, C) Secado durante 24 h a  $T= 37^{\circ} C$ .

**Figura 12.** Películas de almidón modificado con los productos de PET degradado con arcilla montmorillonita K5.

**Figura 13.** Películas de almidón modificado con los productos de PET degradado con arcilla montmorillonita K30.

**Figura 14.** Pruebas mecánicas realizadas en el Centro de Investigaciones Científicas (CIC). A) Resistencia a la tracción, B) Obtención de datos para calcular el Modulo de Young.

**Figura 15.** Determinación de la humedad de las películas de almidón modificado. A) Termo Balanza para determinar la humedad, B) Obtención de datos de humedad.

**Figura 16.** Degradación del PET usando arcilla de montmorillonita a diferentes temperaturas y relaciones en masa.

**Figura 17.** Espectro de FTIR de los productos de degradación del PET usando K5(A)

**Figura 18.** Espectro de FTIR de los productos de degradación del PET usando K30(B)

**Figura 19.** Espectro de RMN H1 del PET degradado con arcilla K5.

**Figura 20.** Espectro de RMN H1 del PET degradado con arcilla K30.

**Figura 21.** Mecanismo de degradación del PET usando arcilla K30 y K5.

**Figura 22.** Espectro de FTIR de las biopelículas formadas con almidón y productos degradados por el efecto de la arcilla K5.

**Figura 23.** Espectro de FTIR de las biopelículas formadas con almidón y productos degradados por el efecto de la arcilla K30.

**Figura 24.** Curva esfuerzo-deformación de la muestra "ANP-100".

**Figura 25. (A)** Curva esfuerzo-deformación de las 3 películas de almidón modificado con PET degradado con arcilla K5

**Figura 26. (B)** Curva esfuerzo-deformación de las 3 películas de almidón modificado con PET degradado con arcilla K30

**Figura 27. (A)** Curva esfuerzo-deformación normalizada, de las 3 películas de almidón modificado con PET degradado con arcilla K5

**Figura 28. (B)** Curva esfuerzo-deformación normalizada, de las 3 películas de almidón modificado con PET degradado con arcilla K30

## Índice de tablas

**Tabla 1.** Propiedades físicas y químicas del PET

**Tabla 2.** Composición química de las K-Montmorollinita [24]

**Tabla 3.** Análisis superficial de las K-Montmorollinita [24]

**Tabla 4.** Contenido de amilosa/amilopectina

**Tabla 5.** Trabajos previos al presente proyecto

**Tabla 6.** Formulación de películas

**Tabla 7.** Área de las señales de vibración del PET y PET degradado

**Tabla 8.** Valores porcentuales de humedad de las películas de almidón modificado

## Índice de gráficas

**Gráfica 1.** Resumen del mercado, pronóstico de crecimiento anual del 6.64 % (CAGR) del periodo 2020 - 2025. (-mil millones de dólares)

**Gráfica 2.** Consumo de resinas plásticas en México - (unidad por tonelada)

**Gráfica 3.** Porcentajes de basura encontrados en 42 sitios en 10 ciudades costeras de México.

**Gráfica 4.** Análisis de humedad de las biopelículas de almidón con PET degradado y arcillas.

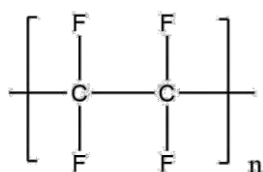
## 1. Introducción

La contaminación ambiental por plásticos convencionales, por productos de degradación de polímeros y por microplásticos ha aumentado en los últimos años. Reciclar y reusar estos materiales se convierte en una oportunidad para mejorar el manejo de los efectos negativos que causan en el medio ambiente y en la salud pública. En México, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), indica que el 80 por ciento de los residuos plásticos que son producidos en el hogar y el trabajo son reutilizables o reciclables. El polietileno tereftalato (PET) es un termoplástico que ha jugado un rol muy importante los últimos 15 años en la vida de seres humanos. En el mundo se consumen aproximadamente 26 millones de toneladas de PET al año. Hoy en día, es casi imposible dejar de producir y usar PET, uno de los poliésteres más importantes y utilizado debido a sus características físicas y químicas: es un polímero ligero, transparente, impermeable al agua y gases, con buenas propiedades mecánicas, no tóxico y no altera las propiedades del contenido, por mencionar algunas de sus características. El PET se puede reciclar principalmente por métodos físicos y químicos. Los métodos de reciclado físico son los más utilizados que los métodos químicos, ya que el material no experimenta una transformación química. Dentro del reciclado químico, hay una diversidad de procesos químicos para reciclar el plástico, de los cuales destacan la metanólisis y la hidrólisis. Sin embargo, hay pocos estudios sobre el uso de los productos de degradación del PET, así como también el uso de arcillas de montmorillonitas como catalizadores para degradarlo. Uno de los inconvenientes en la mayoría de los procesos de reciclado químico es el uso o producción de sustancias agresivas para el ser humano y para la naturaleza misma. Por lo cual, el objetivo de este proyecto, es proponer un método químico alternativo para la degradación del PET usando etileno carbonato e hidróxido de potasio y dos catalizadores de la arcilla montmorillonita (K5 y K30) y su incorporación en una matriz de almidón nativo de plátano macho, para generar una película con los productos de degradación del PET, siendo esta una propuesta económica y menos agresiva para el medio ambiente.

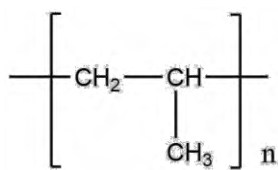
## 2. Marco teórico

### 2.1 Breve historia de los polímeros y su tendencia nacional

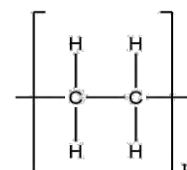
Un polímero es un sistema formado por un conjunto de macromoléculas, es decir, un sistema de entidades moleculares de gran dimensión, que se obtienen por la unión covalente de un gran número de unidades monoméricas repetitivas [1]. Las estructuras macromoleculares (**Figura 1**) correspondientes a esta definición tienen dimensiones moleculares (masa molar) mucho mayores que las de las moléculas simples. Lo cual proporciona al polímero propiedades de aplicación práctica en el campo de los materiales, textiles, aislantes, selladores, etc [2].



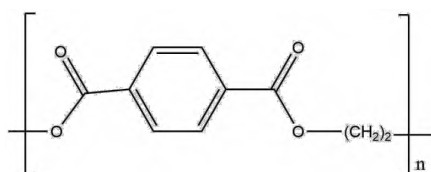
Estructura del PTFE  
(Politetrafluoroetileno)



Estructura del PP  
(polipropileno)



Estructura del PEAD  
(polietileno de alta densidad)



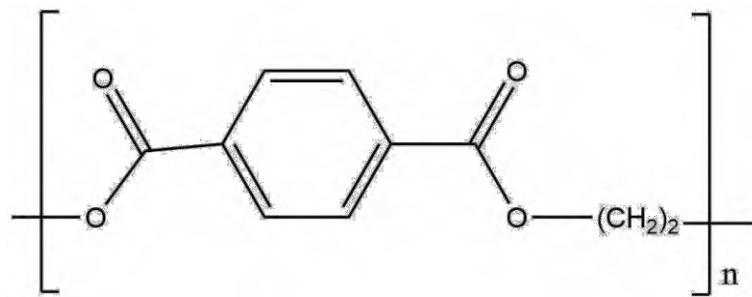
Estructura del PET  
Polietilen tereftalato

**Figura 1.** Algunos polímeros convencionales

El creciente interés de los consumidores en la sostenibilidad medioambiental, han impulsado la demanda de envases que sean más amigables con el medio ambiente. La adopción de botellas de PET puede resultar en una reducción de peso de hasta un 90 % en comparación con el vidrio, lo que principalmente permite un proceso de transporte más económico. En 2019, en México la demanda de PET fue de 900,000 toneladas, 75 % de PETv y 25 % de PET. México es líder en el acopio de PET al recuperar el 59% de las botellas de PET que se colocan en el mercado para su reciclaje [3,4].

## 2.2 Polietilen Tereftalato (PET)

El PET o polietilen tereftalato es uno de los polímeros termoplásticos con mayor auge en el mercado. Es un polímero lineal o poco ramificado, pertenece a la familia de los poliésteres, caracterizado por tener funcionalidades ésteres dentro de sus cadenas macromoleculares principales (**Figura 2**). El PET es un polímero semicristalino, exhibe muchas propiedades que son deseables para aplicaciones de barrera **[5]**. Estas propiedades incluyen una alta rigidez, alta temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ,  $80^\circ\text{C}$ ), resistencia a la tracción y fuerza de impacto, resistencia química, claridad, procesabilidad, capacidad de color. Muchas empresas producen PET virgen a nivel mundial dándole diferentes nombres comerciales, como arnite o castrin por mencionar algunos ejemplos **[6]**.



**Figura 2.** Unidad monomérica del PET

El PET es incoloro, puede ser transparente (si es amorfo) o translúcido (si es semicristalino), característica muy importante que a los consumidores les permite ver su contenido. Es tan buen contenedor de bebidas gaseosas que también muestra propiedades de barrera contra la humedad y del CO<sub>2</sub>. Para mejorar sus propiedades, el PET se puede mezclar con otros polímeros y además se puede copolimerizar. La baja flexibilidad de las cadenas del PET es del resultado de la naturaleza del grupo etileno corto y la presencia del grupo p-fenileno. Esta inflexibilidad afecta significativamente a la estructura de PET y sus propiedades físicas y químicas. **[6,7]**

### 2.3 Síntesis del PET

Polietilen tereftalato o poli(tereftalato de etileno), mejor conocido comercialmente como PET, es un copolímero que se obtiene de la condensación de etilenglicol y ácido tereftálico. No es una sustancia o mezcla peligrosa para el consumo y uso humano. La producción a nivel industrial del PET se realiza en dos o tres etapas según el objetivo a cumplir o aplicación comercial:

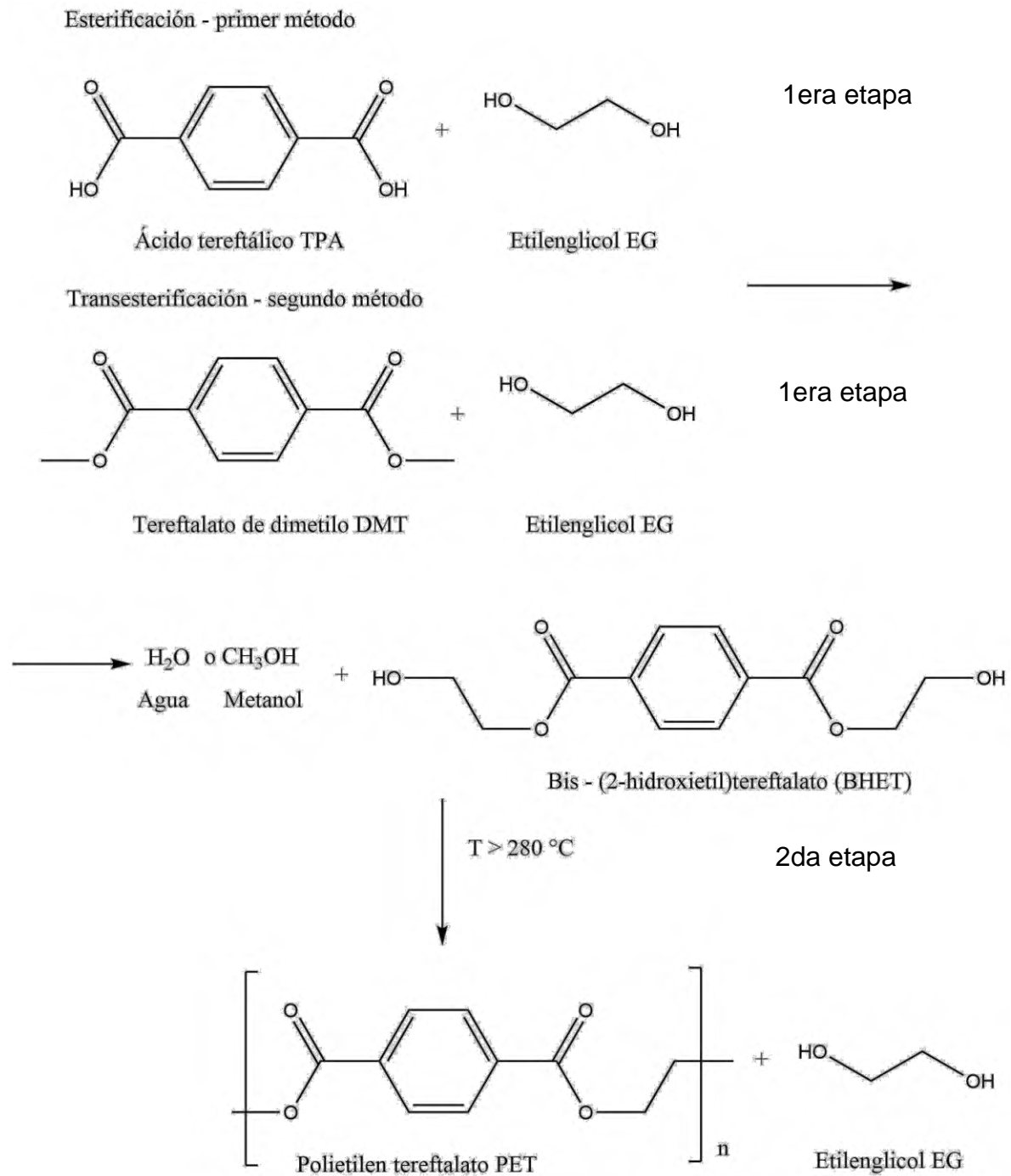
- a) Prepolimerización
- b) Policondensación
- c) Polimerización en estado sólido

En el caso de llevar a cabo la síntesis del PET en dos etapas (**Figura 3**), se realiza lo siguiente:

**1er etapa:** la reacción inicial es una esterificación, reacción en la que el ácido tereftálico (TPA) reacciona con etilenglicol (EG) en un intervalo de temperatura de 240 °C – 260 °C y un intervalo de presión de 300 kPa a 500 kPa

**2da etapa:** La segunda reacción es la reacción de transesterificación, donde se hace reaccionar tereftalato de dimetilo (DMT) con etilenglicol (EG) a 150 °C. Ambas reacciones forman tereftalato de bis(hidroxietilo) (BHET). En el siguiente paso de reacción el BHET se polimeriza en un intervalo de temperatura de reacción de  $250^{\circ}\text{C} < T < 280^{\circ}\text{C}$  y un intervalo de presión de  $2 < \text{kPa} < 3 \text{ kPa}$ . A esta polimerización del BHET se llama policondensación la cual permite controlar la masa molecular del polímero obtenido [1,7].

En la **(Figura 3)** se presenta el mecanismo de reacción para sintetizar el Polietilen tereftalato:



**Figura 3.** Síntesis del PET

## 2.4 Propiedades físicas y químicas del PET

Las propiedades físicas y químicas del PET determinan su uso y la funcionalidad de este plástico. En la **Tabla 1** se presentan algunas de estas propiedades [1,5].

El PET también se conoce bajo su nomenclatura de SciFinder: Poli(oxi-1,2-etanodioxycarbonil-1,4-fenilencarbonilo) y su fórmula empírica es  $C_{10}H_8O_4$

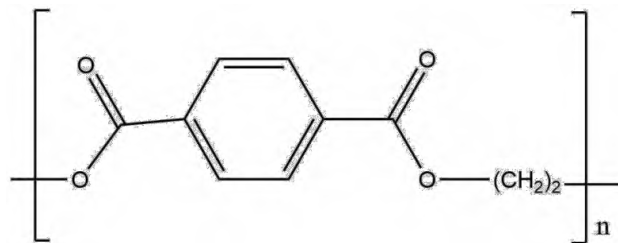
**Tabla 1.** Propiedades físicas y químicas del PET.

Propiedad	Método de prueba	Unidad
<b>Masa molecular (monómero)</b>	-----	192 g/mol
<b>Masa molecular promedio Mn</b>	Masas	30,000-80,000 g/mol
<b>Densidad</b>	-----	1.41 g/cm <sup>3</sup>
<b>Temperatura de transición vítrea</b>	DSC	69 – 115 °C
<b>Temperatura de fusión</b>	DSC	Variable 250-265 ° C
<b>Calor de fusión</b>	DSC	166 J/g
<b>Resistencia tensil</b>	Máquinas de tracción	50 MPa
<b>Resistencia a la tracción</b>	Máquinas de tracción	1700 MPa
<b>Resistencia al impacto</b>	ASTM	90 J/m
<b>Cristalinidad</b>	-----	En función del tratamiento térmico
<b>Resistente a los ácidos</b>	-----	Resistente a ácidos débiles y fuertes
<b>Resistente a bases</b>	-----	Resistente a álcalis débil y fuerte
<b>Apariencia</b>	Visión- DRX	Sólido transparente amorfo o semicristalino
<b>Solubilidad en agua</b>	Prueba de solubilidad	Insoluble

El PET presenta resistencia química a los hidrocarburos, alcoholes, grasas y aceites, éter, bases diluidas y ácidos. Este plástico tiene buena resistencia al envejecimiento debido a su cristalinidad y transparencia. Por otra parte, el PET se deteriora con el paso del tiempo en forma irreversible, esto se debe a condiciones externas como: la temperatura ambiental, radiaciones solares, humedad, contaminantes atmosféricos, y esto conlleva a un cambio en su apariencia física del producto en el que se encuentre [8].

## 2.5 Análisis estructural del PET

La unidad monomérica del PET,  $C_{10}H_8O_4$ , es amorfa (**Figura 4**) en su estructura química, es decir, el anillo de benceno, parte de la estructura monomérica del PET, permite este estado amorfo, reduciendo la movilidad de los grupos unidos, por lo que las cadenas no pueden organizarse adecuadamente [1]. Estos anillos aromáticos presentes en la cadena del PET son voluminosos, lo cual favorece la rigidez y resistencia química. El PET tiene una alta temperatura de fusión  $\sim 265\text{ }^\circ\text{C}$  y una alta estabilidad hidrolítica debido a la presencia de anillos aromáticos en la cadena principal. Actualmente, es el termoplástico más producido y utilizado en el mundo.



**Figura 4.** Estructura química del PET

## 2.6 Aplicaciones del PET

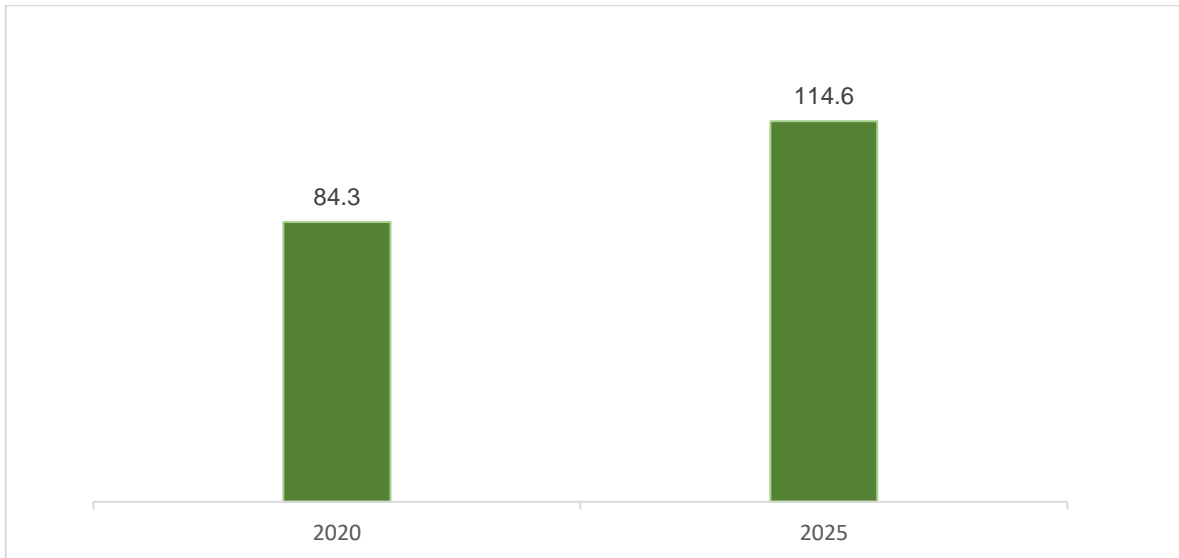
El PET es un excelente material de barrera contra el agua y la humedad, se utiliza para el embalaje de agua mineral, agua pura y refrescos carbonatados; en la industria textil los tejidos de poliéster son fuertes y flexibles, se utiliza principalmente para fabricar tejidos de malla para aplicación agrícola e industriales. El PET tiene propiedades de aislamiento eléctrico, alta estabilidad estructural y dimensional, dichos beneficios permiten el uso en la industria eléctrica y electrónica. El PET es efectivo para reemplazar metales fundidos a presión y termoestables en aplicaciones como: encapsulación eléctrica, contadores inteligentes, piezas fotovoltaicas, etc. El PET también se emplea para fabricar piezas tales como: brazos del limpiaparabrisas y carcasas de engranajes, retenedor de faro, cubierta del motor y carcasas de conectores [5,10].

Algunas aplicaciones del PET [7]:

- a) **Telas (fibras) de PET:** las fibras de poliéster pueden tener un tacto sintético en comparación con los tejidos fabricados con materiales naturales. Este poliéster tiene la ventaja de tener resistencia a las arrugas y se puede hilar con fibras naturales como el algodón y la lana para producir un tejido con mezclas. Sus usos en fibra son: en ropa, muebles, cuerdas para neumáticos, textiles técnicos, sábanas, colchas, cortinas, tapices y en relleno de almohadas y cojines [7].
- b) **Botellas de PET:** las botellas tienen una gran participación en el mercado del agua embotellada y bebidas gaseosas. El PET tiene buenas propiedades de barrera contra el oxígeno y el dióxido de carbono. También se ha encontrado aplicaciones en más nichos, como: envases para bebidas deportivas y jugos de frutas, y para envasar aceites de cocina, ensaladas, salsas y aderezos [7].
- c) **Películas de PET:** las propiedades mecánicas de la película de PET la convierten en un sustrato elegido para una variedad de procesos; como las tecnologías para la metalización al vacío, el recubrimiento y el laminado [7].
- d) **Plástico de ingeniería PET:** también se puede aplicar en la ingeniería utilizándolos en: la electrónica, electricidad y otros campos, como caja de instrumentos y máscaras de aire caliente [7].
- e) **Envases farmacéuticos:** en esta presentación el PET se emplea para envasar medicamentos líquidos, pastillas y cápsulas. Esto se debe a su resistencia química y barrera a la humedad que ayudan a proteger los productos farmacéuticos y a mantener la calidad de éstos [7]

## 2.7 Producción anual del PET versus otros polímeros

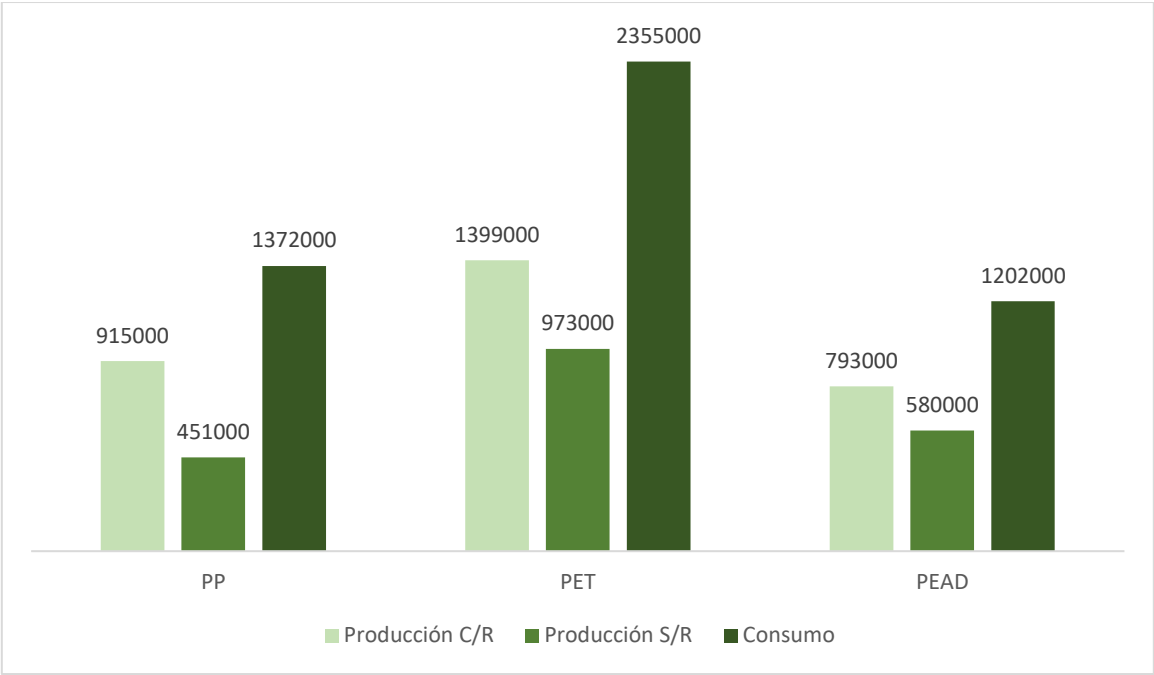
El mercado de botellas de PET se valoró en 84,3 mil millones de dólares en 2019 y se espera que alcance un valor de 114,6 mil millones de dólares para 2025, registrando una CAGR de 6,64% (**Gráfico 1**), en el periodo 2020-2025. Actualmente, las botellas de PET están reemplazando ampliamente a las pesadas y frágiles botellas de vidrio en varios productos [3,11].



**Gráfica 1.** Pronóstico de crecimiento anual del 6.64 % (CAGR) del periodo 2020 - 2025.

La demanda de botellas de PET en el sector de las bebidas experimentará una demanda de agua embotellada y bebidas no alcohólicas, y es que el agua potable de alta calidad le da mayor seguridad en salud a los consumidores, ya que se tiene el miedo a las enfermedades como consecuencia de beber agua del grifo contaminada.

La Asociación Nacional de Industrias del Plástico (ANIPAC) informó que el consumo aparente de plásticos en México fue de 6 millones 933 mil toneladas en 2020. El PET representa un mayor consumo en comparación con el polipropileno y el polietileno de alta densidad, tal como lo representa el **(Gráfico 2) [4,12]**.

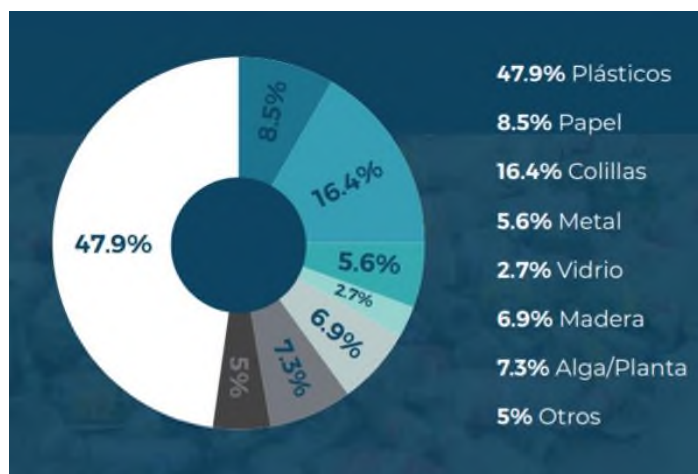


**Gráfica 2.** Consumo de resinas plásticas en México - (unidad por tonelada)

La mitad del consumo y producción de materiales plásticos en México va dirigido a productos de vida corta, acción que es muy similar a nivel mundial. **[4]**.

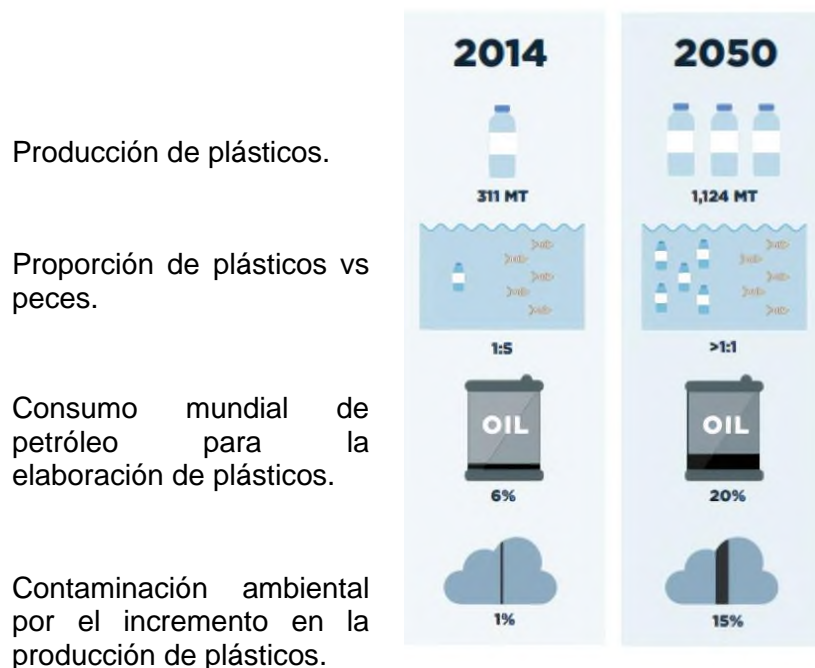
## 2.8 Impacto ambiental

La contaminación por plásticos tiene impactos negativos (**Gráfico 3**). Los plásticos como el PET generan fragmentas por la acción mecánica del viento, las olas en el mar o por la acción química de la degradación de su estructura frente a la exposición a los rayos ultravioletas, produciendo microplásticos que afectan principalmente a la fauna marina, desde el plancton hasta la ballena azul, aproximadamente a más de 700 especies [11].



**Gráfica 3.** Porcentajes de basura encontrados en 42 sitios en 10 ciudades costeras de México. *Imagen de Miguel Rivas y Ornella Garelli.*

Los plásticos representan alrededor del 6% de las emisiones (contaminantes) totales por uso del petróleo (**Figura 5**), para el 2050 indican que representarán hasta el 20% del petróleo utilizado en el mundo, contribuyendo aún más en dañar el medio ambiente. Además, es necesario considerar que los productos plásticos continúan emitiendo gases de efecto invernadero cuando están a la intemperie, expuestos a la luz ultravioleta/solar, y aun desechados, estos contribuyen en aumentar la temperatura del planeta. El principal problema medioambiental del PET es su disposición, ya que una vez se convierte en residuo es notoria su presencia en los canales de corriente superficiales y drenajes [13].



**Figura 5.** Impacto de la producción de plásticos para 2050. Imagen de *The New Plastics Economy*

Actualmente, la producción y uso de plásticos representan alrededor del 6% de las emisiones totales por uso del petróleo, sin embargo, los cálculos de su producción para el 2050 indican que representarán hasta el 20% del petróleo utilizado en el mundo, contribuyendo así a agravar la emergencia climática (**Figura 5**). Los productos plásticos emiten gases de efecto invernadero como el metano o el etileno cuando se encuentran expuestos a la luz solar, y esto contribuye al aumento de la temperatura del planeta. Las bolsas o productos llamados *commodities* del supermercado al finalizar su uso son desechadas al ambiente y el gas etileno que produce por el efecto de la fotodegradación es muy contaminante, por lo que se espera encontrar alternativas que contrarresten esta problemática. [11, 13].

## **2.9 Reciclaje del PET**

El proceso de reciclaje del PET se divide en varios tipos de reciclaje: reciclaje primario, reciclaje secundario, enzimático y químico. El reciclaje primario es más popular y fácil por su fácil acceso y bajo costo. Este reciclaje se ocupa de la reutilización de materiales en su forma original. Sin embargo, el principal problema asociado al reciclaje primario es la restricción en su usabilidad después de ciertos ciclos como la disminución en sus propiedades materiales con el paso del tiempo **[14]**.

Otro tipo de reciclado del PET, es el reciclaje químico que se puede definir como el proceso en el que el PET se transforma químicamente en monómeros o se despolimerizan parcialmente en oligómeros. Estos monómeros que se obtienen del proceso de reciclaje químico se pueden utilizar para desarrollar nuevos polímeros con las propiedades deseadas o para volver a sintetizar PET **[15]**.

La principal ventaja del proceso de reciclaje químico sobre los otros procesos de reciclaje es que este método es capaz de transformar los desechos plásticos en moléculas completamente nuevas, que son adecuadas para su uso como materias primas, incluidos monómeros, oligómeros y mezclas de otros compuestos de hidrocarburos **[16]**. El reciclaje químico para polímeros de condensación es: la hidrólisis ácida, alcalina y neutra, glucólisis, metanólisis, aminólisis, amonólisis, etc. Los polímeros de condensación, como el PET y el nailon, se degradan para preparar unidades de monómero, es decir, en materia prima o reciclaje de monómeros **[14]**.

## 2.10 Tipos de degradación de polímeros

Los polímeros sufren diferentes tipos de degradación, cuando esto sucede, se refiere a que se lleva a cabo el cambio de propiedades físicas causadas por las reacciones que escinden a los enlaces poliméricos. Los tipos de degradación son: térmica, mecánica, química, fotoquímica, química radiante y biológico. Existen muchos agentes que llevan a cabo el inicio de la degradación de los polímeros, entre estos encontramos aquellos con naturaleza física, como: las cargas, el calor y la luz; y los agentes químicos se caracterizan por sus efectos químicos, como: la oxidación y la hidrólisis [18,19].

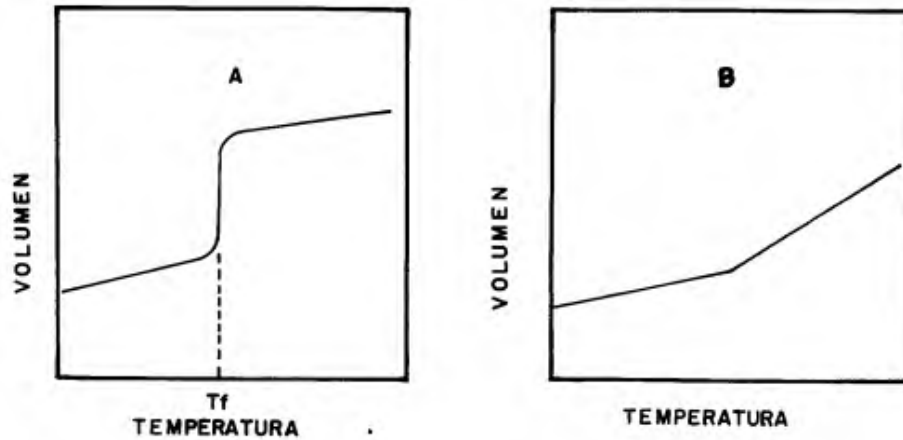
✓ Tipos de degradación

### a) Degradación térmica

Las macromoléculas orgánicas son estables por debajo de ciertas temperaturas, entre 100 y 200°C. Si la temperatura se eleva demasiado las moléculas se descomponen en fragmentos pequeños radicales libres, iones libres, H<sub>2</sub>, CO, etc. Esto se debe a que las uniones son covalentes y tienen una resistencia limitada, que es vencida por el calor. La estabilidad térmica de un material plástico depende de dos mecanismos [18].

- El primero es un proceso reversible y representa el ablandamiento del material al aumentar la temperatura.
- El segundo mecanismo es la descomposición irreversible de la sustancia debido al calor. Este proceso depende tanto de la temperatura como del tiempo y es afectado por la atmósfera circundante.

Al calentar o enfriar un plástico se observan comúnmente dos tipos de transiciones. La transición es de primer orden **Figura 6A**, cuando las propiedades del material cambian abruptamente. La transición de segundo orden, **Figura 6B**, es más gradual y usualmente se puede relacionar con los segmentos amorfos del polímero [18].



**Figura 6.** Transiciones (A) de primer orden y de segundo orden (B)

La principal transición de segundo orden, es la transición vítrea. Esta ocurre a temperaturas mucho menores que el punto de fusión, normalmente la relación  $T_g/T_f$  varía entre 0.58 y 0.78. Al enfriar, por debajo de la temperatura  $T_g$ , el comportamiento cambia de dúctil a frágil. El mecanismo molecular asociado con este proceso es la disminución del movimiento dentro de la cadena del polímero [18,19].

#### b) Degradación por radiación

Las radiaciones de alta energía producen cambios químicos en las sustancias orgánicas. Estos cambios incluyen:

- Formación de enlaces químicos entre moléculas diferentes
- Escisión irreversible dando como resultado la fragmentación de la molécula,
- Desaparición de grupos no saturados.

En el caso de los polímeros, el proceso 1 da como resultado el entrecruzamiento intermolecular, mientras que el 2 la escisión irreversible, lleva a la degradación. La degradación inducida por la luz en los polímeros está relacionada con los cambios producidos por la irradiación con luz visible o ultravioleta. Para que ocurra una fotoreacción es la absorción de luz. Los enlaces saturados como C-C, C-H, O-H,

C-Cl, etc., absorben luz de longitudes de onda inferiores a 200nm. Los grupos carbonilos y los enlaces dobles C=C tienen máximos de absorción en las longitudes de onda entre 200 y 300 nm. Esto implica que sólo un pequeño número de polímeros son capaces de absorber radiación solar, cuyo intervalo espectral está limitado a unos 300 nm **[18]**.

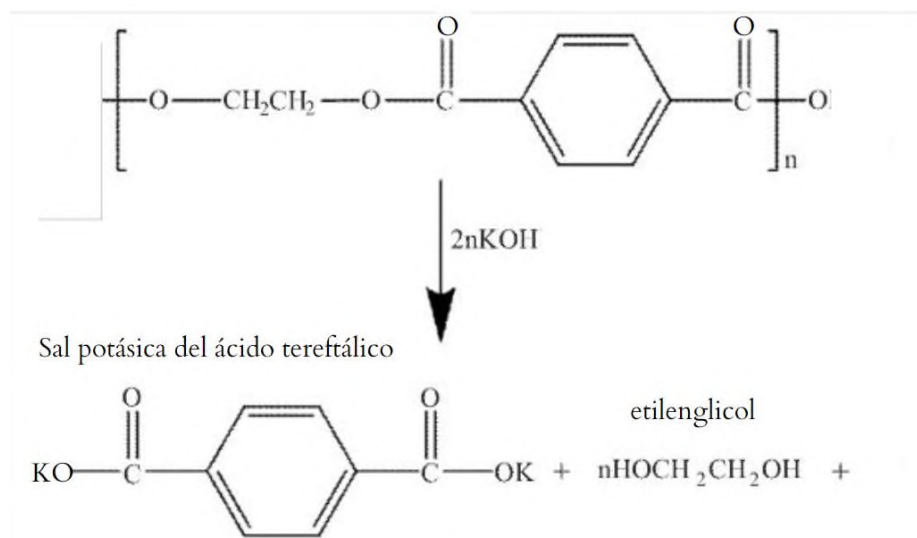
c) Degradación química

La degradación química se refiere a los procesos que son inducidos por el influjo de reactivos químicos: ácidos, bases, solventes, gases reactivos, etc. que entren en contacto con los polímeros. Los materiales poliméricos son susceptibles tanto a la reacción química de sus componentes por separado, como a la desintegración de la estructura básica, es decir, las moléculas de cadena larga. En el deterioro de los polímeros comerciales es de primera importancia la escisión en cadenas **[18]**.

## 2.11 Productos de la degradación química del PET

Los procesos de reciclaje químico para PET se implementaron casi en paralelo a la fabricación del polímero a escala comercial. Con el tiempo, un alto consumo de PET y la falta de regularización para su desecho, así como la conciencia pública, hicieron que se pusiera énfasis en su reciclaje de los residuos postconsumo [17].

Por otra parte, el proceso de hidrólisis que puede llevarse a cabo en un medio neutro, ácido o alcalino. Entre estos tres procesos, bajo las mismas condiciones de degradación (temperatura, presión, concentración), la hidrólisis alcalina del PET es más rápida que las hidrólisis ácida y neutra [1,18]. A partir de la hidrólisis alcalina se llega a la sal de tereftalato de potasio y etilenglicol, tal como se muestra en la (Figura 7).



**Figura 7.** Degradación alcalina del PET.

En los últimos años ha aumentado el interés por la producción de productos intermedios oligoméricos a partir de residuos de PET de componentes especializados para la industria química. Sin embargo, hay pocos trabajos de investigaciones sobre el uso del reciclado o uso de los productos de degradación del PET [1,18,19]. De igual manera hay pocos trabajos de investigación que utilicen arcillas de montmorillonita para degradar el PET.

## 2.12 Arcillas

Las arcillas son procedentes de las rocas ígneas que surgen de masas fundidas procedentes del interior de la Tierra, son el producto de la disgregación parcial o total de las rocas ígneas por acción del agua, los agentes atmosféricos, la temperatura y la presión, durante muy largos períodos de tiempo

Las arcillas son los componentes químicos esenciales de los suelos y sedimentos debido a que son, en su mayor parte, productos finales de la descomposición de los silicatos que son inestables en medio exógeno. Las arcillas son materiales con una diversidad de aplicaciones, por ejemplo, como materiales cerámicos y de construcción, revestimientos y rellenos de papel, lodos de perforación, moldes de fundición, productos farmacéuticos, como materiales adsorbentes, catalizadores o soportes de catalizadores, intercambiadores de iones, por mencionar algunos ejemplos [20]. Los dos tipos de arcillas más amplias son: las arcillas aniónicas y las arcillas catiónicas. Las primeras también conocidas como arcillas de hidróxidos doble en capas (LDHs, de sus siglas en inglés) son raras en la naturaleza, pero relativamente simples y económicos para sintetizar en el laboratorio y a escala industrial. Las segundas conocidas también como minerales arcillosos de naturaleza generalizada. Las principales propiedades relevantes de las arcillas catiónicas para las aplicaciones catalíticas son su composición química y el tamaño de las partículas [21]. Dentro de estas arcillas encontramos la caolinita, la hidrotalcita, la brucita, la laponita, la bentonita y la montmorillonita (MMT o Mt, por sus siglas en inglés), por mencionar algunas. Sin embargo, la MMT ha ganado relevancia sobre otras arcillas debido a sus diversas propiedades, abundancia, respeto por el medio ambiente, gran área de superficie interna, alta capacidad de intercambio catiónico, alta capacidad de adsorción, capacidad de hinchamiento (puede absorber de 20-30 veces su volumen en agua), toxicidad baja o nula, buena biocompatibilidad [22,23]. La palabra montmorillonita deriva de la localidad francesa Montmorillon, lugar de Francia en la que se descubrió esta arcilla típica en 1874. Hay diferentes tipos de MMT comerciales, las cuales se pueden denotar por “K-

montmorollinita” donde K representa su capacidad de intercambio catiónico del K<sup>+</sup>. Por ejemplo, la K5, K10, K20 y K30.

En la **Tabla 2** se presenta la composición química de algunas K-Montmorollinita comerciales reportadas en la literatura.

**Tabla 2.** Composición química de las K-Montmorollinita [24]

Tipo	Componente químico						
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
<b>K5</b>	65.0	19.0	4.8	0.2	2.4	0.3	1.5
<b>K10</b>	73.0	14.0	2.7	0.2	1.1	0.6	1.9
<b>K20</b>	75.0	12.5	2.4	0.3	1.2	0.3	1.5
<b>K30</b>	80.0	10.0	1.8	0.2	1.0	0.3	0.5

También se ha llevado a cabo su análisis superficial de estas arcillas, en la Tabla 3 se muestran los resultados.

**Tabla 3.** Análisis superficial de las K-Montmorollinita [24].

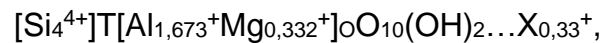
Muestra	Densidad aparente del bulbo (g/litro)	Área superficial BET (m <sup>2</sup> /g)	Volumen del poro (ml/g)		
			0–80 nm	0–24 nm	0–14 nm
<b>K5</b>	600	200	0.25	0.22	0.18
<b>K10</b>	370	240	0.36	0.30	0.26
<b>K20</b>	470	240	0.39	0.32	0.30
<b>K30</b>	450	330	0.50	0.44	0.38

De los resultados anteriores se observa que hay una tendencia, tanto en composición química como en su análisis estructural, siendo las arcillas K5 y K30 los extremos en estas características. La arcilla K5 contiene más concentración de metales o posibles iones intercambiables con respecto a la arcilla k30. En cuanto al

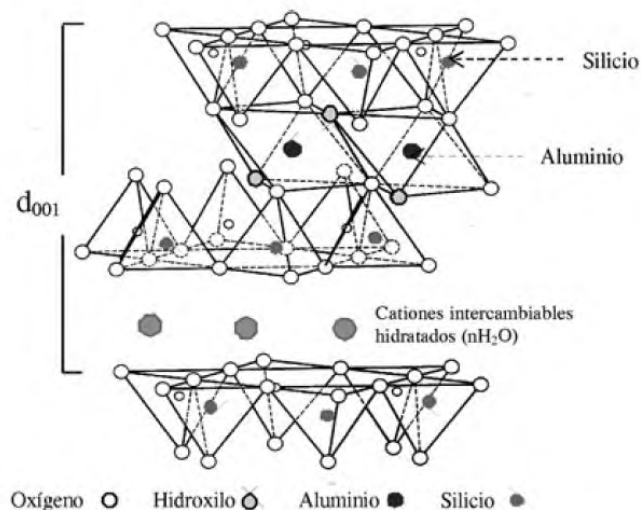
área superficial y tamaño del volumen del poro, la arcilla K30 contiene mayor área y tamaño con respecto a la arcilla K5 [25]. Estos dos factores son importantes a considerar en un proceso catalítico donde se lleva a cabo una síntesis o degradación química. En cuanto a la estructura química de las arcillas MMT, en la literatura se han reportado esquemas de estas (Figura 8).

### 2.13 Formula y estructura de las arcillas

Las arcillas tienen en sus estructuras capas de  $(Si_2O_5)^{2-}$  tetraédricas en combinación con capas octaédricas de  $(Al_2(OH)_4)^{+2}$  o  $(Mg_3(OH)_4)^{+2}$  [26,25]. Las arcillas del grupo de las esmectitas, del mineral montmorillonita, su estructura es de tipo dioctaédrica y tienen una formula general:



Las esmectitas poseen agua en el espacio interlaminar y la cantidad de agua está determinada por el tipo de cationes presentes. En la (Figura 8) se muestra la estructura general de las esmectitas [25].



**Figura 8.** Estructura química de la arcilla tipo esmectita, montmorillonita.

## 2.14 Propiedades fisicoquímicas de las arcillas

Dentro de sus propiedades físicas y químicas, las arcillas de tipo montmorillonita no son tóxicas, de bajo costo y fácil disponibilidad, por lo que resultan importantes en diferentes áreas, tales como, geología, agricultura, catálisis, industria y procesos de remediación ambiental. Sus partículas son generalmente de tamaño inferior a 2  $\mu\text{m}$ . Dadas sus características físicas y químicas, este tipo de arcillas puede utilizarse en la degradación del PET y combinarse con el almidón [23,26].

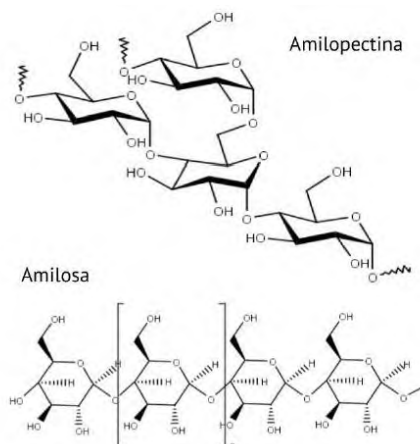
Las arcillas tienen la capacidad de absorber agua y poder dispersarse en ella. Esta capacidad de absorción del agua se debe a la estructura tipo lámina que tiene la arcilla, a las capas cargadas y a los bordes activos. Estas estructuras tipo láminas agrupadas, provee espacio interlaminar permitiendo la interacción con otras moléculas o iones. Las fuerzas de van der Waals existen en las arcillas por las capas cargadas y los bordes activos que atraen otras especies con cargas opuestas. Estas características permiten que la arcilla sea utilizada para la remoción de iones pesados en el agua, adsorbentes de contaminantes aceitosos y de desperdicio animal, también son utilizados como transportadores para la liberación controlada de pesticidas y fertilizantes [43].

## 2.15 Almidón

El almidón es un polisacárido cuya principal fuente de obtención son los cereales, leguminosas, tubérculos y frutos, por ejemplo: el maíz, frijol, papa y el plátano macho, por mencionar algunos. Desde el punto de vista químico, el almidón es una mezcla de dos polisacáridos muy similares, la amilosa y la amilopectina. Estos dos polisacáridos del almidón le confieren las propiedades características a este biopolímero, siendo su proporción lo que difiere para cada fuente, lo cual influye en las propiedades funcionales como es su capacidad espesante, emulsionante y formadora de película. Su composición química en almidones normales se distribuye aproximadamente entre un 20-30% de amilosa y un 70-80% de amilopectina (**Figura 9**) dependiendo de la fuente de almidón [2,27].

**La amilosa** es considerado un polímero lineal formado por unidades de D-glucosa donde predominan los enlaces  $\alpha$ -(1,4) con pocas ramificaciones en enlaces  $\alpha$ -(1,6), con una masa molecular aproximada de  $1 \times 10^5$ - $1 \times 10^6$  Da y con un grado de polimerización variado dependiendo la fuente [2,28]. Tiene la facilidad de adquirir una conformación tridimensional helicoidal en la que cada vuelta de la hélice consta de seis moléculas de glucosa (**Figura 9**). A demás de presentar la capacidad de formar películas.

**La amilopectina** es un polímero altamente ramificado con cadenas cortas de enlaces  $\alpha$ -(1,4) las cuales se ramifican por enlaces  $\alpha$ -(1,6) y se presentan cada 25-30 unidades de glucosa (**Figura 9**), su masa molecular aproximada se encuentra entre  $1 \times 10^7$ - $1 \times 10^9$  Da. El arreglo de cada gránulo es complejo con un crecimiento radial, en el que se altera una región amorfa y una región cristalina dando como resultado lo que se consideran como anillos de crecimiento. Este arreglo radial se puede observar en el fenómeno conocido como birrefringencia que se conoce también como cruz de malta resultado de observar el gránulo en el microscopio de luz polarizada [28, 29].



**Figura 9.** Estructura de los componentes del almidón, amilopectina y amilosa.

Entre las aplicaciones, en la actualidad los almidones también se utilizan con fines industriales como aditivo en el cemento, en la extracción de petróleo, en la fabricación de papel, en los enlucidos de yeso, en los tableros tipo Pladur, como recubrimiento de semillas, fertilizantes, envases, adhesivos, bioplásticos, compositos [2].

### **2.16 Propiedades fisicoquímicas del almidón**

Las propiedades fisicoquímicas y funcionales de los almidones nativos, están influenciadas por su estructura granular y molecular, esto les permite poder actuar en diferentes sistemas como: espesante, estabilizante, gelificante, agente de retención de agua, etc., y puedan ser utilizados como aditivos en alimentos. Los gránulos de almidón son insolubles en agua fría, debido a que su estructura está altamente organizada y a que presenta una gran estabilidad por las múltiples interacciones que existen con sus dos polisacáridos constituyentes; sin embargo, al calentarse el almidón con agua, tiende a disolverse [2,28].

## 2.17 Almidón de plátano

Los plátanos (*Musa paradisiaca* L.), pertenecientes a Musaceae, Musa, son hierbas perennes que se distribuyen ampliamente en regiones tropicales y subtropicales. Los cultivos de plátanos son de baja inversión, alta eficiencia y rápido ingreso al mercado, se han desarrollado rápidamente y se han convertido en una industria esencial en la economía rural. El área de los huertos de banano es de aproximadamente 392,000 hectáreas y su producción anual es de 18 millones de toneladas al año. Los plátanos son ricos en carbohidratos, vitamina B, vitamina C, potasio, magnesio y otros elementos minerales. Sin embargo, los plátanos son un tipo de fruta climatérica y respiratoria que son perecederos, lo que conduce a graves problemas económicos, pérdidas durante el período de maduración concentrado. Además, el 10-15% de todos los plátanos cosechados no pueden venderse como plátanos comerciales, pero pueden utilizarse como materia prima para la extracción de almidón resistente (AR) y otros ingredientes funcionales. Por lo tanto, es necesario hacer un uso completo de los recursos de plátano verde. El almidón es el principal componente del banano verde, representa más del 70% del peso seco de la fruta [30].

En la **Tabla 4** se muestra el contenido de amilosa y amilopectina del plátano macho y otras fuentes botánicas.

**Tabla 4.** Contenido de amilosa/amilopectina. [31]

FUENTE	AMILOSA (%)	AMILOPECTINA (%)
Maíz	27	63
Plátano	35	65
Papa	21	69

En general los gránulos de almidón tienen formas variadas según la fuente botánica, el almidón de plátano macho presenta formas ovales, elipsoidales o irregulares alargadas con un tamaño promedio entre 20µm a 50µm (**Figura 10**).



**Figura 10.** (a) Plátano macho (b) micrografía electrónica de barrido del almidón de plátano macho.

Las características fisicoquímicas del almidón de plátano han sido ampliamente estudiadas. Un estudio de almidón de tres variedades de plátanos y confirmó que las formas y tamaños de los gránulos de almidón de plátano son irregulares. La estructura cristalina se parecía al almidón de tipo C, y la mayoría de los gránulos tenían estrías finas y densas. Además, el almidón de plátano macho se ha estudiado en los últimos años ya que tiene un alto contenido de amilosa y de acuerdo a la literatura, esta característica facilita la modificación química del almidón mejorando sus propiedades fisicoquímicas. De diversas modificaciones químicas, la reacción tipo injerto del almidón es una de las más utilizadas actualmente para mejorar las propiedades físico-químicas y funcionales del almidón de manera significativa [30,31].

## 2.18 Películas de almidón

Hay un importante número de polímeros degradables que son derivados de fuentes naturales y sintéticas. La utilización de productos de almidón en la aplicación de plásticos es considerada una alternativa para reducir los desechos sólidos. Las películas a base de almidón han sido usadas principalmente en la protección de alimentos y productos farmacéuticos tanto de la humedad como del oxígeno y para el encapsulamiento de ingredientes activos, gracias a su disponibilidad, bajo costo, renovabilidad y degradabilidad.

Las propiedades de las películas de almidón tales como el esfuerzo a la tensión, el porcentaje de elongación, permeabilidad al vapor de agua y al oxígeno son directamente dependientes de sus componentes y de las condiciones de procesamiento, los cuales son generalmente a través de extrusión o vaciado en placa.

En general, las películas de almidón, en ausencia de plastificante son quebradizas. La adición de plastificantes puede mejorar la flexibilidad y la extensibilidad de las películas por reducción de la interacción molecular entre las moléculas de almidón e incrementa la movilidad de las cadenas. Sin embargo, este mejoramiento está relacionado con el tipo de plastificante. El glicerol generalmente es el que da mejores efectos en las propiedades funcionales de la película, resultando en una disminución significativa de la permeabilidad al vapor de agua y en el esfuerzo a la tensión, pero un incremento en el porcentaje de elongación.

Uno de los procesos principales para la formación de las películas es el “proceso húmedo”, que involucra la dispersión o solubilización de los biopolímeros en una solución para la formación de película, seguida por la evaporación del solvente. Un ejemplo es el método *solvent casting*, en el cual, luego deformada la solución de los componentes de película, se realiza la evaporación del solvente a temperatura y humedad controladas. El método casting ha sido usado para la elaboración de películas de almidón [32-34].

### 3. Antecedentes

En la **Tabla 5** se presentan algunos de los proyectos de investigación relacionados con el presente proyecto.

**Tabla 5.** Trabajos previos al presente proyecto.

Autor (es)	Año	Aportación Científica
Vassiliou et al. <b>[35]</b>	2010	Realizaron la síntesis del PET usando monmorillonita modificada orgánicamente llamada comercialmente como cloisita para obtener nanomateriales. Ellos encontraron que las viscosidades intrínsecas de los nanocompositos preparados se vieron afectadas por la adición de las nanopartículas y en ambos casos se observó un ligero aumento.
Ramírez-Hernández et al. <b>[36]</b>	2010	Llevaron a cabo la degradación de PET usando hidróxido de potasio en 1-butanol, variando la temperatura y la concentración. ellos encontraron una degradación del 99% de PET en un tiempo de una hora. Ellos obtuvieron dos fases: una orgánica y una sólida.
Ramírez-Hernández et al. <b>[37]</b>	2015	Estudiaron el comportamiento térmico y estructural de películas de almidón de plátano macho con desechos de PET degradado. Los productos de degradación obtenidos a partir del PET fueron principalmente ácido tereftálico, dímeros de ácido y cadenas macromoleculares residuales, los cuales mostraron un distinto comportamiento térmico.
Espinoza-García et al. <b>[38]</b>	2017	Realizaron la degradación de PET (botella) con EC en masa catalizado por KOH a 130°C y estudiaron la estructura química de los productos degradados de PET. El PET se degradó a oligómeros difuncionales de aproximadamente 1000-2000 Da de masa molar con cadenas cortas de poliéter que conectan a anillos de tereftalato con un contenido significativo de grupos carbonato después de 24 horas de reacción.

<p>Ramírez-Centeno et al. <b>[39]</b></p>	<p>2021</p>	<p>Realizaron in situ la modificación química del almidón de platano (<i>Musa paradisiaca</i> L.) con los productos de degradación de PET virgen y PET botella. Ellos propusieron tres estructuras químicas a partir de la caracterización de FTIR y RMN. Encontraron que la morfología del gránulo de almidón modificado está directamente relacionada con la proporción de masa de almidón/PET y el tipo de PET utilizado en la reacción.</p>
<p>Belioka et al. <b>[40]</b></p>	<p>2023</p>	<p>Investigaron la cinética de degradación térmica de las mezclas de PET/PLA utilizando arcillas, datos termogravimétricos no isotérmicos y un modelo de simulación basado en el mecanismo de escisión aleatoria. Ellos encontraron un modelo que describe bastante bien la degradación térmica de varias mezclas de PET/PLA en un amplio rango de conversión.</p>

Hasta el momento no se ha reportado en la literatura la degradación del PET usando arcillas de montmorillonita como la K5 y K30.

#### **4. Planteamiento del problema**

En México y en el mundo los plásticos, los microplásticos y los productos de degradación de los plásticos provocan un gran daño medioambiental. La ANIPAC menciona que en México el consumo de resinas plásticas es de 6 millones de toneladas anuales, de las cuales se consume 2.35 millones de toneladas de PET. La problemática radica cuando el PET es desechado al terminar su vida útil, su destino no solo es dirigido a vertederos o basureros establecidos, sino también es muy común encontrarlo en el medio ambiente dañando en mayor proporción a la fauna marina. Una posible alternativa para disminuir este problema es degradar químicamente al PET usando arcillas de montmorillonita y usar los productos de degradación del PET, para incorporarlos en una matriz polimérica de almidón.

## **5. Justificación**

El impacto ambiental por el desecho de los plásticos convencionales no biodegradables o que presentan una lenta biodegradación como es el caso del PET es cada vez mayor. Por lo que, se tienen que buscar alternativas para reciclarlo químicamente. Una de ellas, es llevar a cabo la degradación del PET usando arcillas de montmorillonita y utilizar los productos de degradación en una matriz de almidón de plátano macho para obtener nuevos materiales. En el caso del almidón de plato macho es un fruto característico de la región de la cuenca del Papaloapan que se cosecha prácticamente en todas las estaciones del año, es de bajo costo y sencilla extracción. Por otra parte, las características físicas opuestas de las arcillas comerciales de montmorillonita k5 y k30, permitirá comprender la degradación del PET usando arcillas.

## **6. Hipótesis**

Los productos de degradación del polietilen tereftalato se incorporarán en una matriz polimérica de almidón.

## **7. Objetivos**

### **7.1 General**

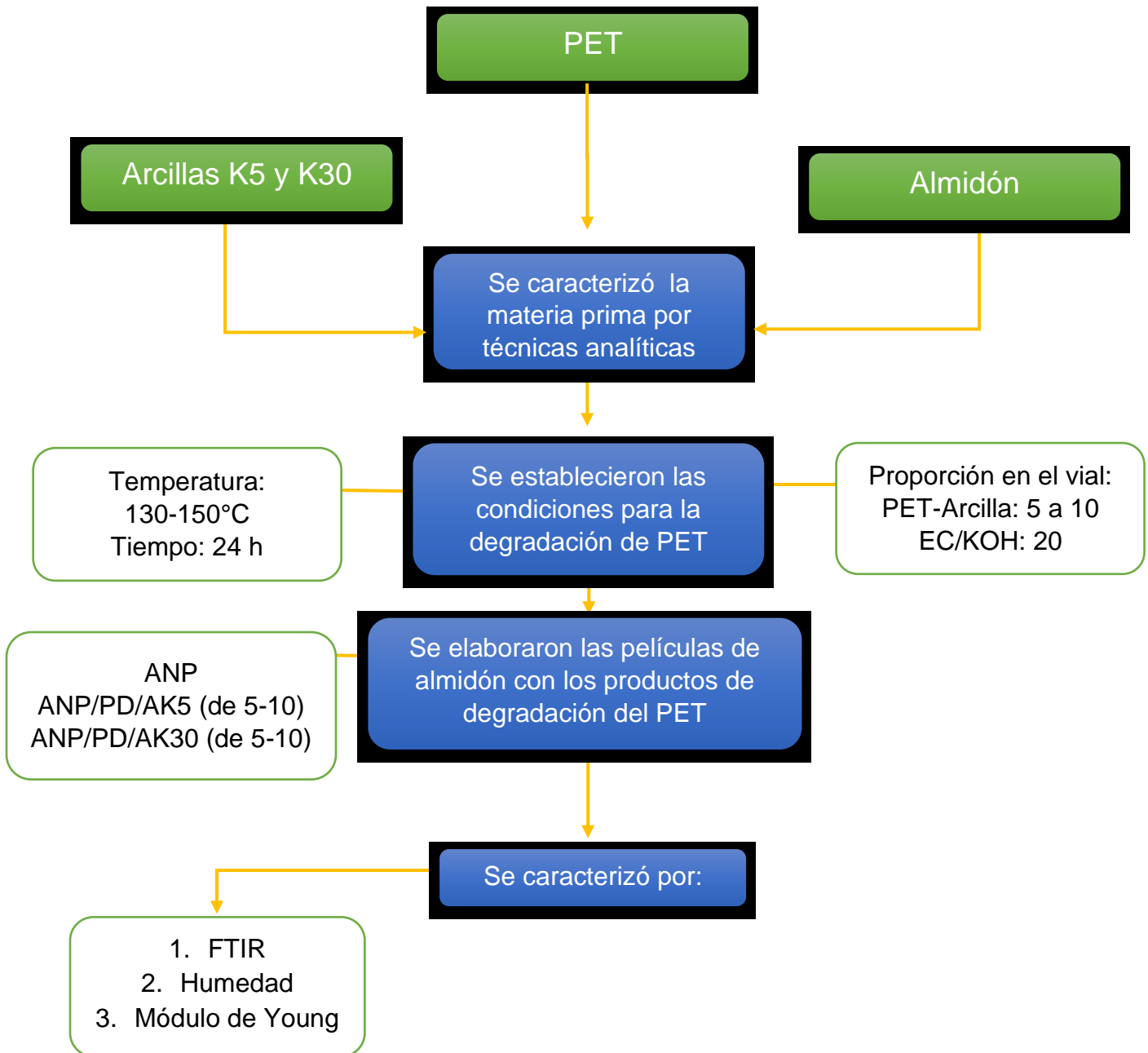
Llevar a cabo la degradación del PET usando arcillas de montmorillonita como catalizador e incorporar los productos de degradación en una matriz polimérica de almidón.

### **7.2 Específicos**

- a) Caracterizar por técnicas analíticas el polietileno tereftalato de botella, el almidón y las arcillas montmorillonitas K5 y K30.
- b) Degradar el polietileno tereftalato mediante hidrólisis alcalina, utilizando arcillas montmorillonitas K5 y K30 como catalizadores.
- c) Caracterizar mediante técnicas analíticas (FTIR, RMN) el material degradado.
- d) Incorporar los productos de degradación del polietileno tereftalato en una matriz polimérica de almidón para obtener películas.
- e) Caracterizar mediante técnicas analíticas (FTIR, Porcentaje de humedad, Modulo de Young) las películas de almidón modificado.

## 8. Desarrollo experimental

El esquema 1 muestra cómo se llevó a cabo la ejecución de este proyecto de tesis, cumpliendo con el objetivo general, posteriormente se especificará de manera detallada cada procedimiento hasta llegar al producto final, una película de almidón de plátano macho con PET degradado:



Para desarrollar este experimento se utilizaron las siguientes materias primas: plátano macho, arcillas montmorillonita K5 y K30 de carácter comercial y polietileno tereftalato. El plátano macho que se usó es de la variedad *Musa paradisiaca L.* obtenido del “Rancho Valente” de la región del Papaloapan, Tuxtepec, Oaxaca; se utilizó en estado fisiológico inmaduro, es decir, verde. Las arcillas montmorillonita K5 y K30 se adquirieron de forma comercial en Sigma-Aldrich, de aspecto sólido en polvo y color beige. El polietileno tereftalato (RPET) se obtuvo del corte de botellas de agua postconsumo; se utilizó el cuerpo cilíndrico de la botella, con un espesor de aproximadamente 200  $\mu$ . Hidróxido de potasio (KOH), dimetilsulfóxido (DMSO-d<sub>6</sub>), carbonato de etileno (EC), estos reactivos fueron suministrados por Sigma Aldrich Chemistry Company. Se utilizó glicerol como agente plastificante del almidón ( $T_f = 160\text{ }^\circ\text{C}$  y  $\rho = 1.26\text{ g/ml}$ ).

### **8.1 Degradación química del PET utilizando arcillas montmorillonitas K5 y K30 como catalizador.**

La degradación química del PET se llevó a cabo en un vial de vidrio de 10 ml, bajo la relación en masa de RPET (0.5g)/EtilenoCarbonato (1.0g)/KOH (0.05g), arcilla K5,K30 (0.05g-0.10g). El RPET se lavó y se cortó en escamas de menos de 0,5 cm x 0,05 cm. Se agregaron los reactivos al vial y se colocó en una plancha de calentamiento durante un tiempo de 24 horas con agitación constante a una temperatura entre 130 -150  $^\circ\text{C}$ . Una vez transcurrido el tiempo de reacción, la mezcla de reacción se vertió sobre agua destilada, el precipitado se filtró (papel de filtro Whatman 1), se lavó con agua hasta pH neutro y se secó al vacío. La relación óptima en peso de los reactivos de almidón, EC, KOH, una temperatura óptima de 130  $^\circ\text{C}$  y un tiempo de 24 h se tomaron de Ramírez-Centeno et al. [39].

## 8.2 Incorporación del producto degradado del PET al almidón de plátano, formación de películas.

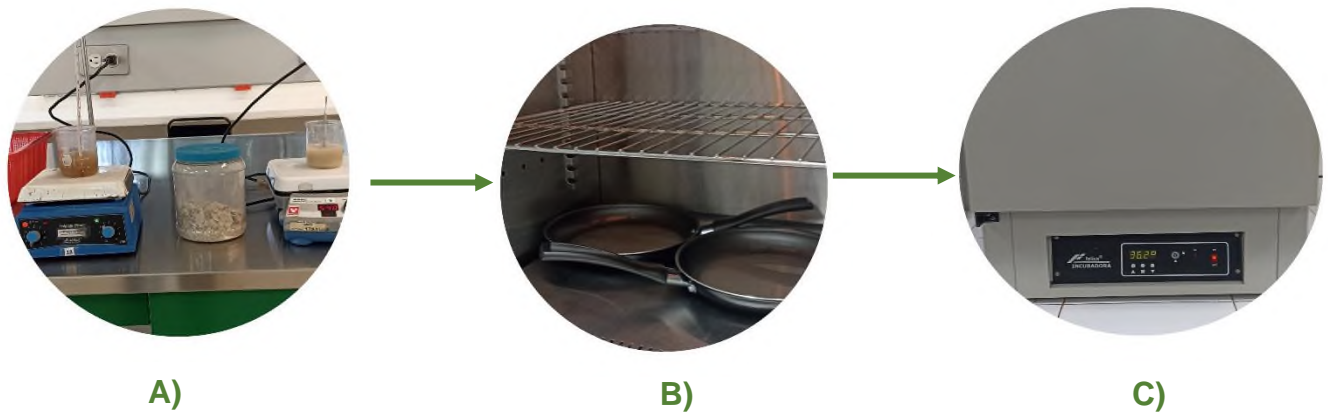
Las películas se obtuvieron por el método de casting que consistió en PET degradado con la dispersión del almidón en agua a 85 °C durante 20 minutos seguido de la evaporación del agua a temperatura y humedad controladas. La formulación química de las películas fue la siguiente **Tabla 6**:

**Tabla 6.** Formulación de las películas\*.

<b>Película</b>	<b>Almidón de plátano (%)</b>	<b>PET degradado-arcilla K5 (%)</b>
1 PANP-100	100	-
2 P1APETd(K5)-5	95	5
3 P1APETd(K5)-7	93	7
4 P1APETd(K5)-10	90	10
<b>Película</b>	<b>Almidón de plátano (%)</b>	<b>PET degradado-arcilla K30 (%)</b>
5 P1APETd(K30)-5	95	5
6 P1APETd(K30)-7	93	7
7 P1APETd(K30)-10	90	10

\*A las películas se le adiciono 1.8 g de glicerol como plastificante; un total de la mezcla física sin agua es de m=5.4 g.

Cuando se alcanzo el punto de gelatinización se procedió a la evaporación del agua; se colocó la mezcla en un recipiente extendido. Se llevo a cabo en una incubadora marca FELISA, se programo a una temperatura T=37 °C y la evaporación duro 24 h. Posteriormente a las películas formadas se le realizaron las diferentes pruebas y caracterizaciones para el analisis y discusión de resultados. El proceso se muestra en la siguiente **Figura 11**:



**Figura 11.** A) Elaboración de las películas por el método de casting, B) Secado de las películas formadas, C) Secado durante 24 h a  $T = 37^{\circ} \text{C}$ .

Después de 24 h de secado, se obtuvieron las siguientes películas **Figura 12- Figura 13** de acuerdo a la formulación de la **Tabla 6**.



**Figura 12.** Películas de almidón modificado con los productos de PET degradado con arcilla montmorillonita K5.



**Figura 13.** Películas de almidón modificado con los productos de PET degradado con arcilla montmorillonita K30.

Después de obtener las películas se prepararon para su posterior análisis a través de técnicas analíticas como: FTIR, porcentaje de humedad y módulo de Young.

### 8.3 Caracterización del PET degradado y las películas de almidón modificado.

Las técnicas analíticas son necesarias para la caracterización de los productos de degradación del Polietileno Tereftalato, el almidón, las arcillas y de las biopelículas formadas en el segundo paso del experimento. Las técnicas de caracterización que se utilizaron fueron: FTIR, RMN.

#### ✓ FTIR

Los espectros infrarrojos se registraron a temperatura ambiente en un espectrómetro Perkin-Elmer Spectrum 100 FT-IR (ATR) con una resolución de  $4\text{ cm}^{-1}$  y se promediaron en 16 exploraciones en el rango de  $4000$  a  $650\text{ cm}^{-1}$ . Esta técnica permitió analizar cualitativamente la estructura molecular de la materia prima y la de los productos obtenidos

#### ✓ RMN

Los espectros de RMN ( $^1\text{H}$ ) se midieron en un equipo Bruker Avance TM 400WB con una frecuencia de  $400,14\text{ MHz}$ . Esta técnica permitió elucidar la estructura química de los productos obtenidos.

### 8.4 Pruebas mecánicas de las películas de almidón modificado.

Los ensayos que se realizaron a las películas fueron módulo de Young, resistencia a la tracción, elongación y punto de fractura. Estas pruebas se aplicaron a cada película formada; para esto se utilizó el equipo Texture Analyzer (**Figura 14**). Las condiciones de operación fueron: cortes rectangulares de  $4\text{ cm}$  de largo por  $1\text{ cm}$  de ancho de la película muestra y de un espesor promedio de  $0.39\text{ mm}$ , con una  $F=0.07\text{ N}$ , velocidad de deformación  $v=2\text{ mm/s}$ .



A)



B)

**Figura 14.** Pruebas mecánicas realizadas en el Centro de Investigaciones Científicas (CIC) de la Universidad del Papaloapan. A) Resistencia a la tracción, B) Obtención de datos para calcular el Módulo de Young.

### 8.5 Pruebas de humedad las películas de almidón modificado.

Los ensayos de prueba de humedad se le realizaron a cada una de las películas; se llevó a cabo en una termo balanza Shimadzu – Moisture – Balance MOC-120H **(Figura 15)**. Las condiciones de operación fueron:  $T_i = 30^\circ\text{C}$  a una  $T_f: 120^\circ\text{C}$ , se utilizó 1g de muestra y se determinó la humedad en un tiempo  $t = 10\text{-}15$  min.



A)



B)

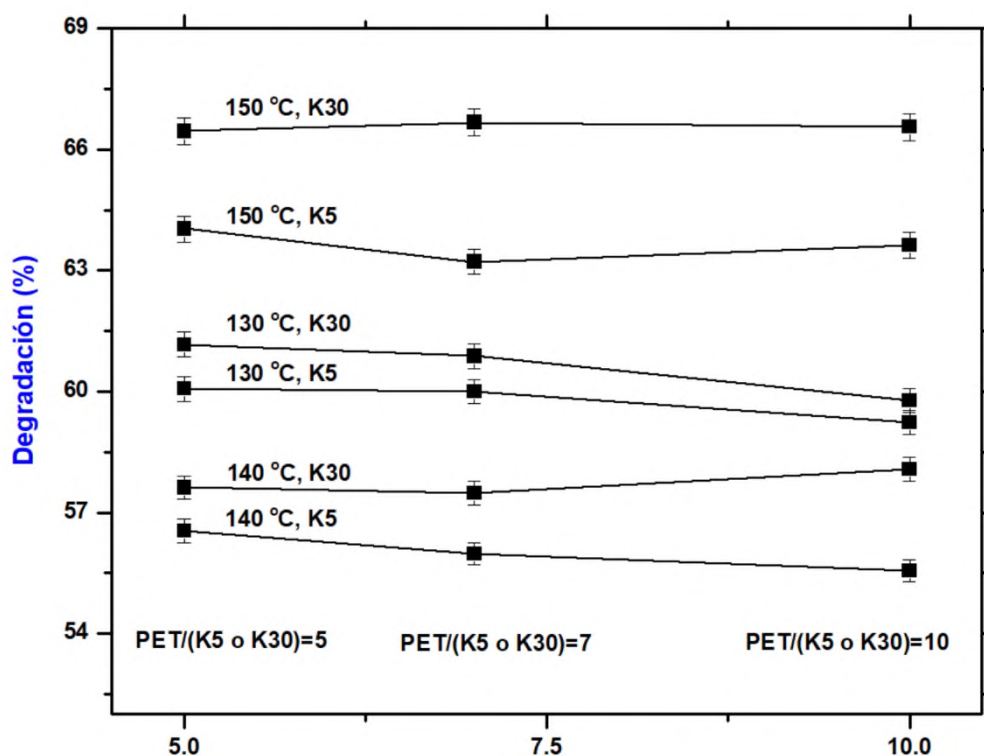
**Figura 15.** Determinación de la humedad de las películas de almidón modificado. A) Termo Balanza para determinar la humedad, B) Obtención de datos de humedad.

## 9. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos de las caracterizaciones y pruebas realizadas se discuten en el siguiente apartado.

### 9.1 Degradación del PET usando arcilla de montmorillonita K5 y K30 a diferentes temperaturas y relaciones de masa

Las condiciones adecuadas de temperatura y relación en masa de PET/(K5 o K30) fueron determinadas, en la **Figura 16** se presentan estos resultados.

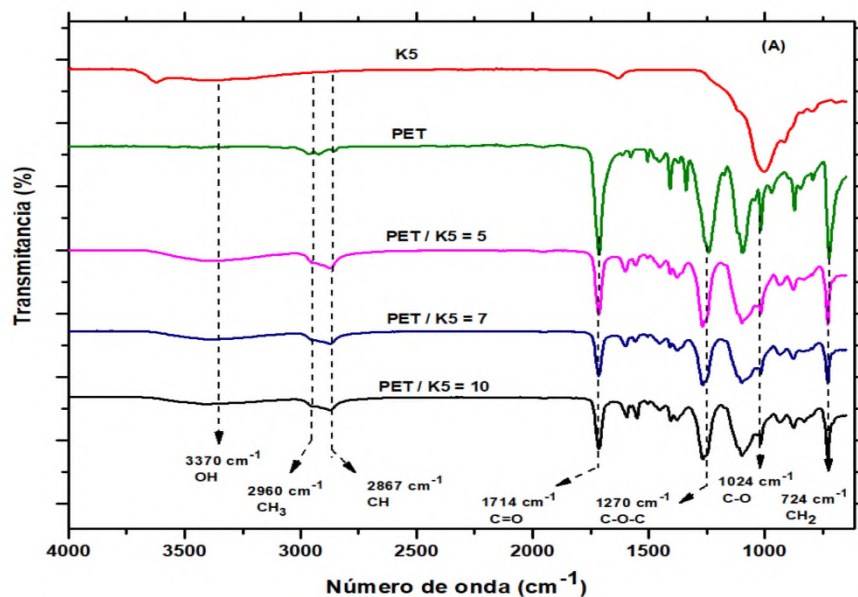


**Figura 16.** Degradación del PET usando arcilla de montmorillonita a diferentes temperaturas y relaciones en masa.

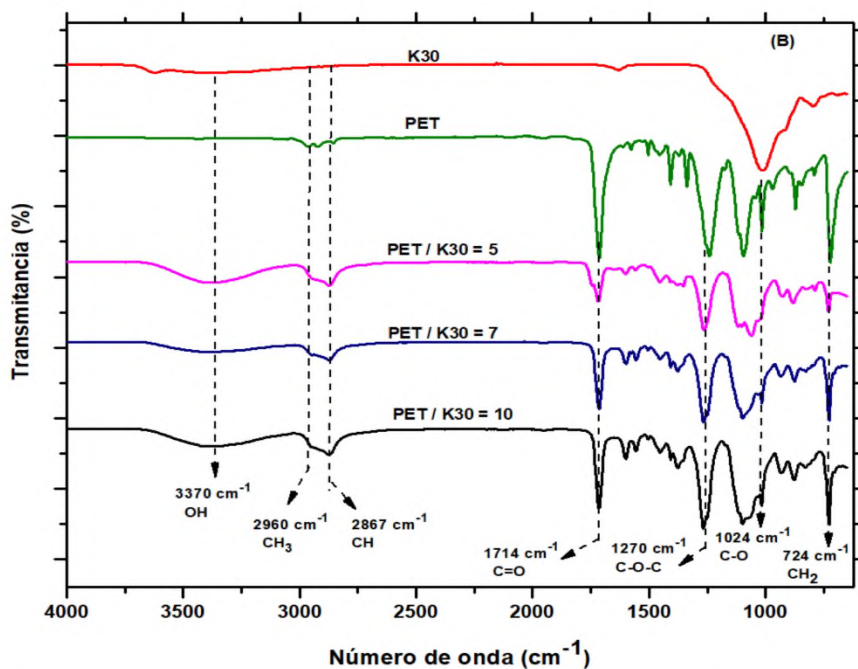
La degradación del PET se favorece usando la temperatura de 150 °C para ambas arcillas, obteniendo un rendimiento del 66.55 % utilizando K30 y de 64.03 % para K5, los cuales son mayores comparados con las otras dos temperaturas. En cuanto a las proporciones adecuadas en masa de PET y arcilla, la relación (m/m) PET/(K5 o K30) = 5 alcanza los rendimientos mencionados para la temperatura de 150 °C.

## 9.2 Analisis por FTIR y RMN de los productos de degradación del PET usando arcilla de montmorillonita K5 y K30 como catalizadores

La caracterización estructural de los productos de degradación del PET fue llevada a cabo usando FTIR y RMN. En la **Figura 17 – Figura 18** se presenta el espectro de FTIR de estos productos usando ambas arcillas.



**Figura 17.** Espectro de FTIR de los productos de degradación del PET usando K5(A)



**Figura 18.** Espectro de FTIR de los productos de degradación del PET usando K30(B)

Las señales de vibración de las dos arcillas (K5 y K30) presentan las señales características del grupo silanol (SiOH), Al<sub>2</sub>OH, enlaces de hidrogeno (-HO---OH-), Si-O y Al-Al-OH presentes en su estructura química, a 3748 cm<sup>-1</sup>, 3622 cm<sup>-1</sup>, 1630 cm<sup>-1</sup>, 1004 cm<sup>-1</sup> y 913 cm<sup>-1</sup>, respectivamente, de acuerdo a lo reportado en la literatura [45,46,47]. En el espectro del PET se observa sus principales señales de vibración, la señal del grupo carbonilo, grupo C-O-C, grupo C-O y grupo CH<sub>2</sub> presentes en el PET se observan en 1714 cm<sup>-1</sup>, 1270 cm<sup>-1</sup>, 1024 cm<sup>-1</sup> y 724 cm<sup>-1</sup>, respectivamente, estas señales corresponden a las reportadas en otras investigaciones [48]. En los espectros de los productos de degradación del PET usando ambas arcillas, estas señales de vibración del PET son observadas. Sin embargo, algunas señales de vibración cambian de intensidad, por ejemplo, las señales de vibración en 1605 cm<sup>-1</sup> y 1550 cm<sup>-1</sup>. Estas señales corresponden a la vibración de deformación de los grupos metilenos. este cambio es proporcional al grado de degradación de las cadenas poliméricas del PET. Un efecto similar se observa en las señales de vibración a 3430 cm<sup>-1</sup> y 1714 cm<sup>-1</sup>, las cuales corresponden a los grupos hidroxilos y carbonilos, respectivamente. El área bajo la curva de estas señales de vibración se presenta la **Tabla 7**.

**Tabla 7.** Área de las señales de vibración del PET y PET degradado

Muestra	Area (u <sup>2</sup> )				
	3430 cm <sup>-1</sup>	1714 cm <sup>-1</sup>	1605 cm <sup>-1</sup>	1550 cm <sup>-1</sup>	724 cm <sup>-1</sup>
PET	44.19	3596	22.41	65	2540
PET/K30=5	4530	1013	96.03	31.35	245.6
PET/K30=7	2242	1462	183.4	114.3	923
PET/K30=10	3920	1606	287.8	132	1092
PET	44.19	3596	22.41	65	2540
PET/K5=5	2609	1569	251	101.4	884
PET/K5=7	1959	1052	177.3	70.49	597
PET/K5=10	1796	1293	205.7	207	900

En la degradación del PET usando la relación en masa PET/K30=5 se encuentra que la relación de las áreas de las señales de vibración de los grupos metilenos a 1605 cm<sup>-1</sup> aumenta 8 veces su intensidad con respecto al PET sin degradar

(Ecuación 1) y viceversa, la señal a  $1550\text{ cm}^{-1}$  disminuye aproximadamente 8 veces su intensidad con respecto al PET sin degradar.

$$\text{Intensidad CH}_2 = \frac{\frac{\text{Area C}}{\text{Area D}}}{\frac{\text{Area E}}{\text{Area F}}} \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde:

Area C: es la señal de vibración a  $1605\text{ cm}^{-1}$  para PET/K30 (o K5) = 5, 7 o 10;

Area D es la señal de vibración  $1550\text{ cm}^{-1}$  para para PET/K30 (o K5) = 5, 7 o 10

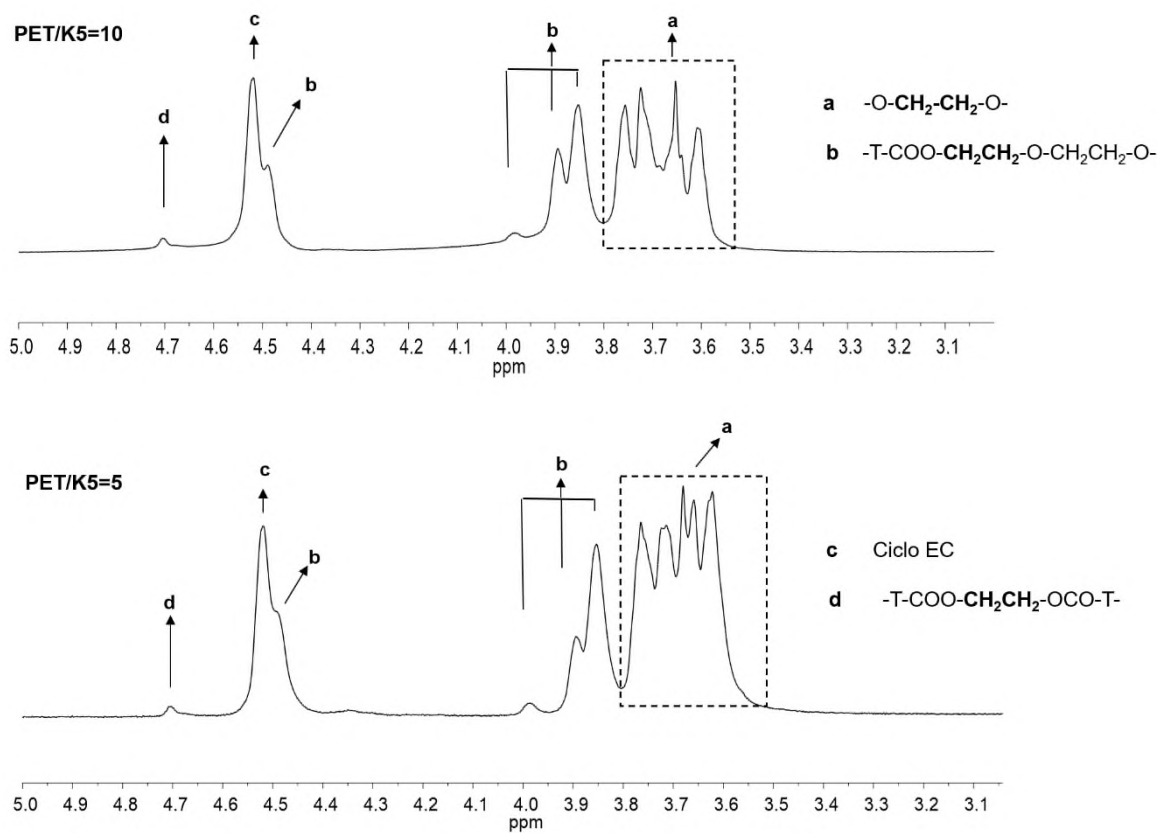
Area E es el área de la señal de vibración del PET sin degradar a  $1605\text{ cm}^{-1}$

Area F es el área de la señal de vibración a  $1550\text{ cm}^{-1}$  del PET sin degradar.

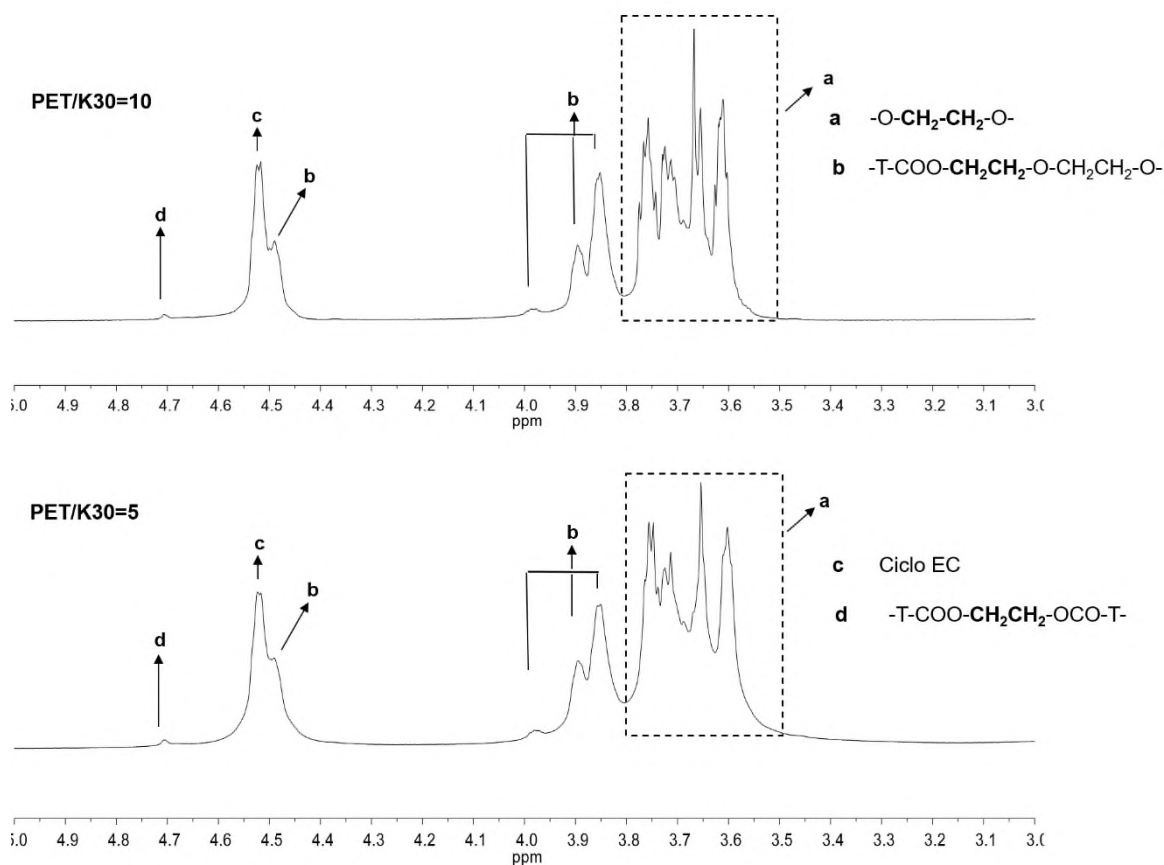
De forma similar ocurre para la relación de áreas grupo hidroxilo/grupo carbonilo, hay un aumento en la intensidad de la señal de vibración de los grupos hidroxilos con respecto a los grupos carbonilos con respecto al PET sin degradar. Estos resultados indican que las cadenas del PET se están degradando a oligómeros. Comparando estos resultados usando las relaciones en masa PET/K30 (o K5) = 7 y 10, se encuentra que cuando disminuye la cantidad de arcilla en el medio de reacción también disminuye las relaciones de las áreas de los grupos metilenos y hidroxilos. Lo cual indica que las arcillas K30 y K5 catalizan la degradación del PET. Por otra parte, comparando los resultados de las dos arcillas, la montmorillonita K30 favorece más la degradación del PET. Esto se debe principalmente al volumen del poro de ambas arcillas, la arcilla k30 tiene el doble del volumen de poro con respecto a K5, de acuerdo a lo reportado en la literatura [49]. Cabe señalar que las señales de vibración del producto degradado del PET usando ambas arcillas son similares a las reportadas en otras investigaciones [50]. Sin embargo, en las otras investigaciones se obtienen más señales de vibración en el intervalo de  $1024\text{ cm}^{-1}$  a  $1270\text{ cm}^{-1}$ , esta región corresponde a la vibración de los grupos C-O y C-O-C presentes en los productos de degradación del PET. Los resultados de FTIR indican que las arcillas favorecen la uniformidad del tamaño de las cadenas o de los oligómeros formados durante la degradación del PET.

## RMN de los productos de degradación del PET

El análisis del producto de degradación del PET por resonancia magnética nuclear de  $H^1$  se presenta en la **Figure 19-Figura 20**. El desplazamiento químico de cadenas que contienen al grupo etoxi (-O-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-O-) se presenta en el intervalo de 3.5 ppm a 3.8 ppm (asignado con la letra a) usando ambas arcillas.



**Figura 19.** Espectro de RMN  $H^1$  del PET degradado con arcilla K5.

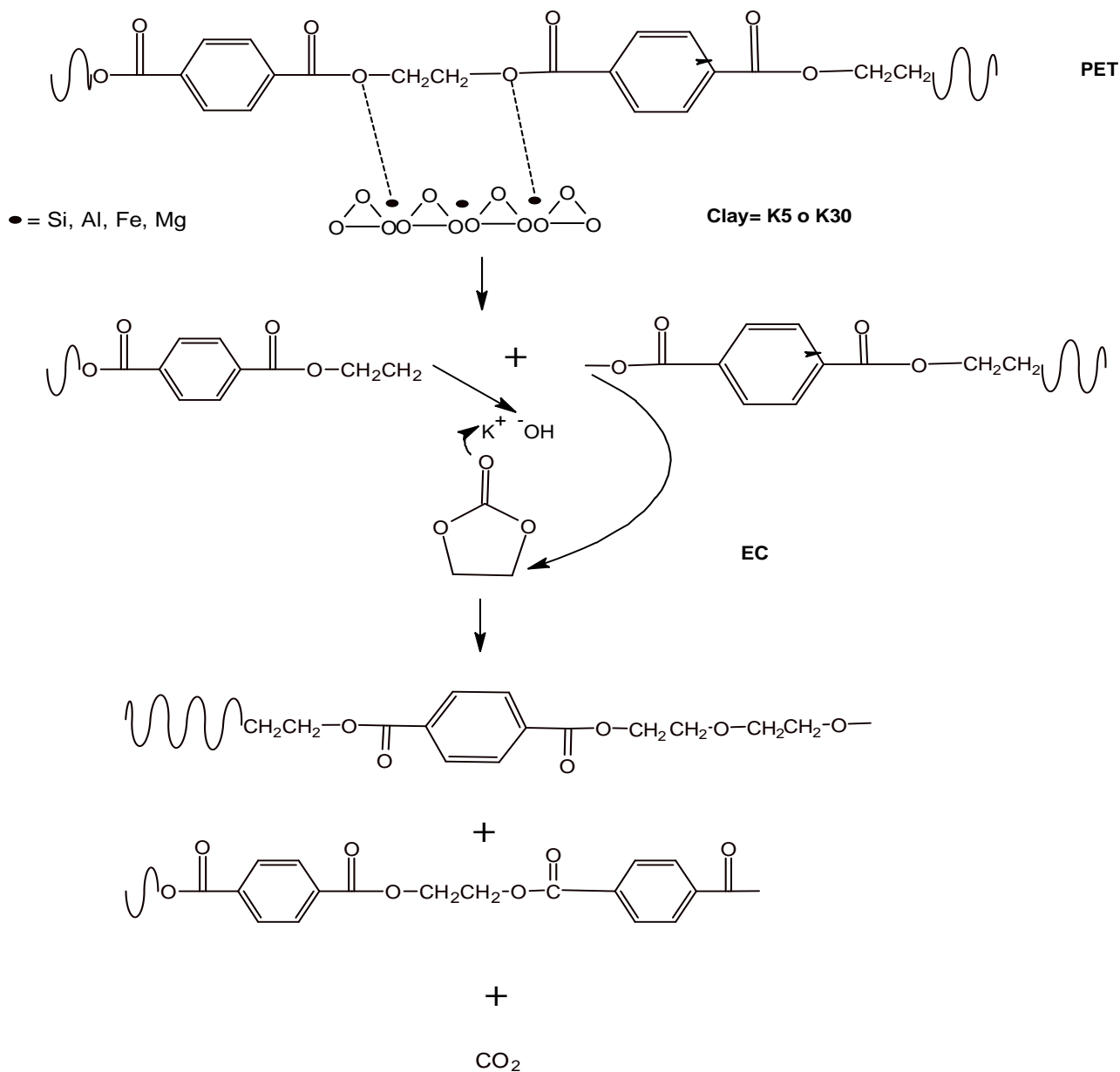


**Figura 20.** Espectro de RMN H<sup>1</sup> del PET degradado con arcilla K30.

La intensidad de este desplazamiento es mayor utilizando la arcilla K30 que K5. Además, utilizando la relación en masa PET/K30(o K5)=10, la definición de estos desplazamiento es mejor. Esto indica que cuando disminuye la cantidad de masa de arcilla se favorece la formación de cadenas etoxi. Este resultado concuerda con los resultados de FTIR, con la señal de vibración a 724 cm<sup>-1</sup>, la cual corresponde al grupo metileno (Tabla 1). Por otra parte, el desplazamiento químico de las cadenas de tereftalato-etoxi (-T-COO-CH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>-O-CH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>-O-) se observan en el intervalo de 3.8 ppm a 4.0 ppm y en 4.45 ppm (asignado con la letra b). La arcilla K5 favorece la intensidad de esta señal y cuando disminuye la relación en masa de PET/K5(o K30)=10. El desplazamiento químico de las cadenas tereftalato-etoxi-tereftalato (-T-COO-CH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>-OCO-T-) se presenta a 4.7 ppm (asignado con la letra d). La intensidad de la señal del EC es mayor usando la arcilla K5 que la arcilla K30.

### 9.3 Mecanismo de la degradación del PET usando las arcillas K5 y K30.

En la **Figura 21** se propone un mecanismo de la degradación del PET usando arcillas K5 y K30.

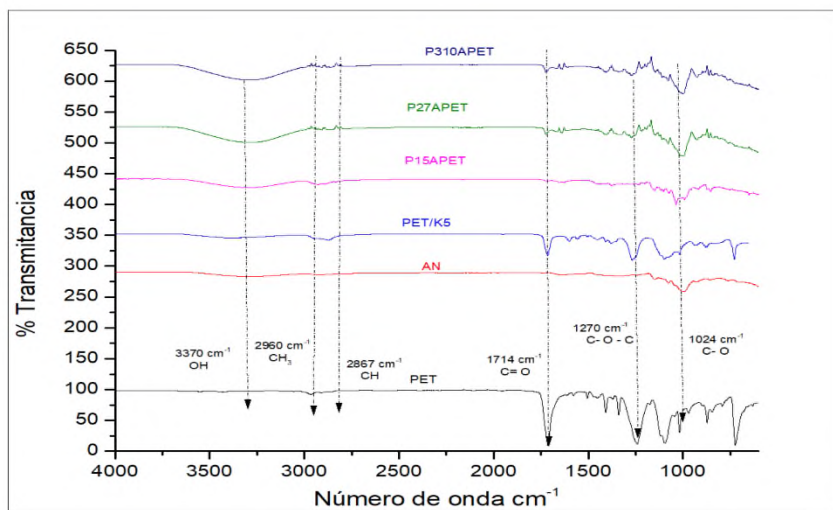


**Figura 21.** Mecanismo de degradación del PET usando arcilla K30 y K5.

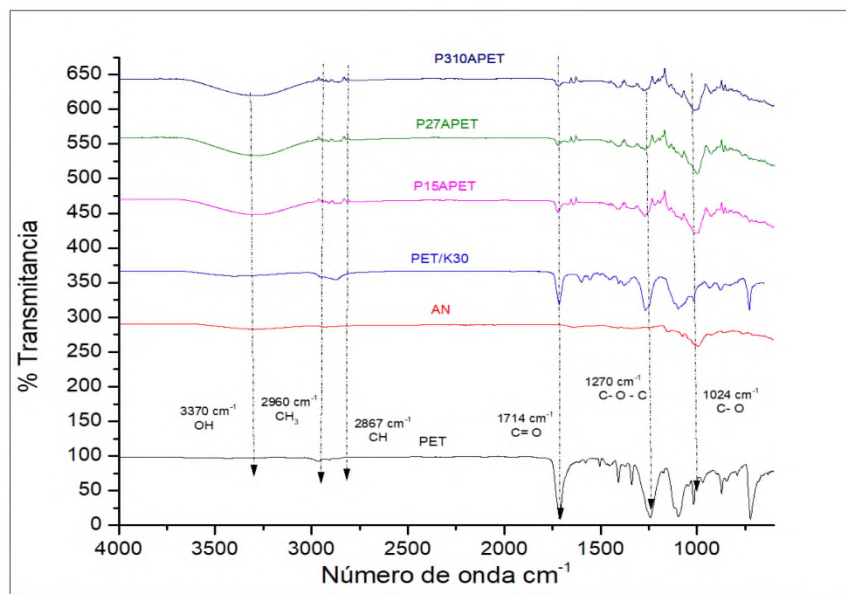
Este mecanismo propuesto es similar al reportado en la literatura [51].

### 9.4 Análisis de IR de las películas PETd/Almidón de plátano macho.

La caracterización estructural de las películas formadas con almidón de plátano macho y los productos de degradación del PET se llevó a cabo por FTIR. En la **Figura 22** y la **Figura 23** se presenta el espectro de FTIR de las películas.



**Figura 22.** Espectro de FTIR de las biopelículas formadas con almidón y productos degradados por el efecto de la arcilla K5.



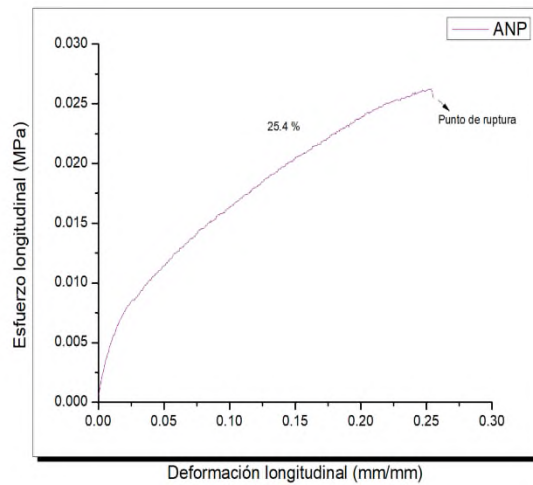
**Figura 23.** Espectro de FTIR de las biopelículas formadas con almidón y productos degradados por el efecto de la arcilla K30.

El objetivo de hacer este análisis es demostrar que sí se llevó a cabo la mezcla física y no una reacción química que provocaría la modificación de la estructura química de los componentes de la mezcla. Las señales de los grupos funcionales no variaron en su número de onda respecto de la **(Figura 17 y Figura 18)**. Las señales de vibración de ambas películas de almidón modificado con PET degradado utilizando arcillas (K5 y K30) presentan las señales características del grupo (OH) a  $3370\text{ cm}^{-1}$ , los grupos  $\text{CH}_3$  y CH entre  $2960\text{ cm}^{-1}$  y  $2867\text{ cm}^{-1}$ . En el espectro se siguen conservando las principales señales de vibración del PET, la señal del grupo carbonilo, grupo C-O-C, grupo C-O y grupo  $\text{CH}_2$  presentes en el PET se observan en  $1714\text{ cm}^{-1}$ ,  $1270\text{ cm}^{-1}$ ,  $1024\text{ cm}^{-1}$  y  $724\text{ cm}^{-1}$ , respectivamente, estas señales corresponden a las reportadas en otras investigaciones **[48]**.

## 9.5 Análisis de las pruebas mecánicas y determinación de humedad de las películas PETd/Almidón de plátano macho

### Pruebas mecánicas de las películas con almidón modificado

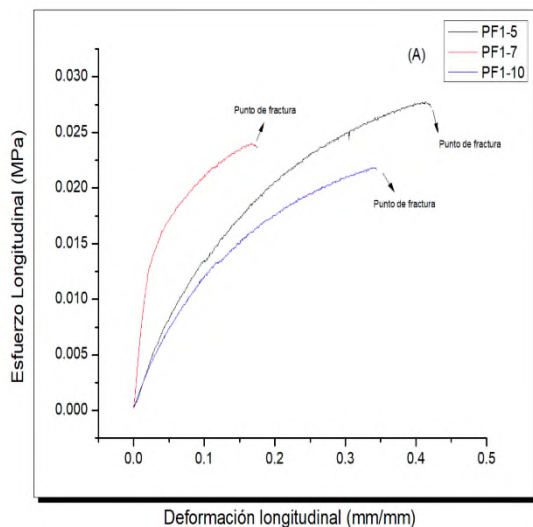
Para entrar en discusión de los resultados obtenidos, el módulo de elasticidad es la razón entre el incremento de esfuerzo longitudinal y el cambio correspondiente a la deformación unitaria. Si el esfuerzo es una tensión, el módulo se denomina módulo de Young, siendo una constante independiente del esfuerzo siempre que no exceda de un valor máximo denominado límite elástico. Tanto el módulo de Young como el límite elástico, son naturalmente distintos para las diversas sustancias.



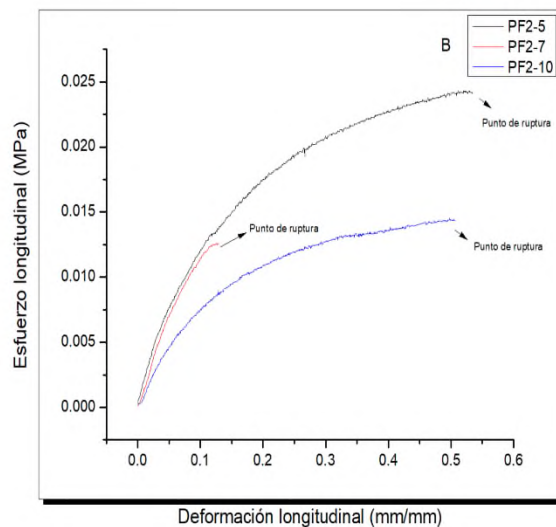
**Figura 24.** Curva esfuerzo-deformación de la muestra “ANP-100”.

La curva esfuerzo-deformación del almidón nativo de plátano (**Figura 24**), presenta un comportamiento elástico continuo en la parte inicial del ensayo, pero a medida que la carga supera la resistencia de unión de las cadenas poliméricas, se comienza a generar una falla de tipo frágil o fragmentada en la zona de comportamiento plástico, a esto se le denomina punto de ruptura. Su porcentaje de elasticidad fue de 25.4 % respecto a la longitud original de la muestra.

## Análisis de fuerza en la curva de esfuerzo deformación normal de las películas de almidón modificado



**Figura 25. (A)** Curva esfuerzo-deformación de las 3 películas de almidón modificado con PET degradado con arcilla K5



**Figura 26. (B)** Curva esfuerzo-deformación de las 3 películas de almidón modificado con PET degradado con arcilla K30

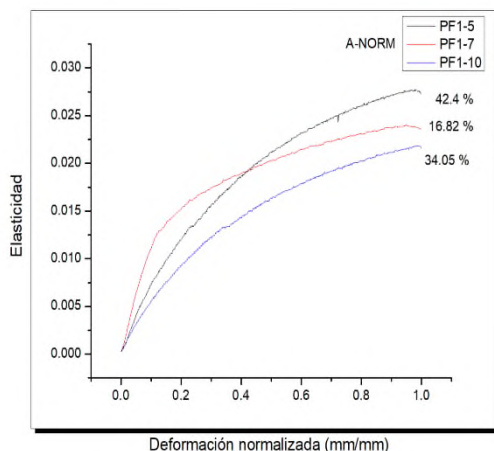
El análisis se realizó por triplicado de las muestras de la película de almidón modificado; las muestras con formulación ANP/PETd/K5 mostraron un comportamiento diferente en cada formulación (5-10) por lo que se hará el análisis en su zona de falla o punto de ruptura y comparar estos resultados con la formulación ANP/PETd/K30. El nivel de porosidad en el corte de las muestras presenta un comportamiento elástico continuo en la parte inicial del ensayo, pero a medida que la carga supera la resistencia de unión en la interface entre el AN y PETd, se comienza a generar una falla de tipo frágil en la zona de comportamiento plástico (depende del porcentaje de cada mezcla física).

Análisis de la **Figura 25 (A)**., para el caso de la muestra PF1-5 tuvo un comportamiento prolongado para deformarse, es decir, se le tuvo que aplicar mayor Fuerza para fracturarla, por lo que su resistencia es mayor respecto a la muestra PF1-7 que tuvo una baja resistencia al punto de ruptura, ocupando una menor

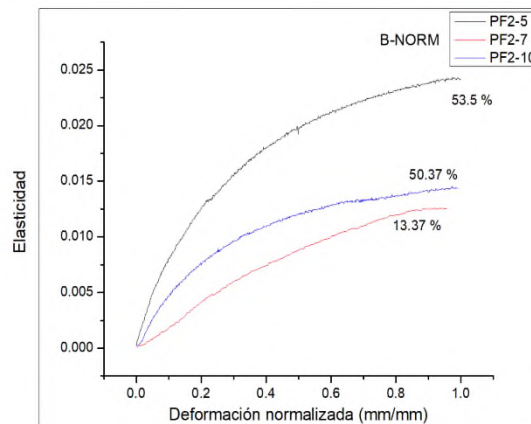
Fuerza para fracturarla, por lo que la proporción entre el ANP y el PETd/K5 de la muestra PEF1-5 es la adecuada si se requiere que tenga una mayor resistencia a deformarse. En términos comparativos de la fuerza que se necesita para llegar a su punto de ruptura es: PEF1-5 > PEF1-10 > PEF1-7.

Análisis de la **Figura 26 (B)**., para el caso de la muestra PF2-5 tuvo un comportamiento prolongado para deformarse, es decir, se ocupó una mayor fuerza para fracturarla, de tal manera que su resistencia es mayor respecto a la muestra PF2-7 que tuvo una baja resistencia al punto de ruptura, ocupando una menor fuerza para fracturarla; por lo que la proporción entre el ANP y el PETd/K5 de la muestra PEF1-5 es la adecuada si se requiere que tenga una mayor resistencia a deformarse. Para el caso de la muestra PF2-10 esta en la media de la deformación de las otras muestras. En términos comparativos de la fuerza que se necesita para llegar a su punto de ruptura es: PEF1-5 > PEF1-10 > PEF1-7.

## Análisis del porcentaje de elasticidad en la curva de esfuerzo deformación normal de las películas de almidón modificado



**Figura 27. (A)** Curva esfuerzo-deformación normalizada, de las 3 películas de almidón modificado con PET degradado con arcilla K5



**Figura 28. (B)** Curva esfuerzo-deformación normalizada, de las 3 películas de almidón modificado con PET degradado con arcilla K30

El análisis se realizó por triplicado de las muestras de la película de almidón modificado; los datos obtenidos se normalizaron para discutir y comparar su porcentaje de elasticidad.

El comportamiento que se observa en:

**Figura 27 (A)** las películas del ensayo con mayor porcentaje de elasticidad 42.4 % es la película PF1-5, lo que implica que tiende a deformarse en un mayor tiempo vs a las otras dos muestras. En términos comparativos del porcentaje de elasticidad que se necesita para llegar a su punto de ruptura es: PEF1-5> PEF1-10> PEF1-7.

**Figura 28 (B)** las películas del ensayo con mayor porcentaje de elasticidad 53.5 % es la película PF2-5, lo que implica que tiende a deformarse en un mayor tiempo vs a las otras dos muestras. En términos comparativos del porcentaje de elasticidad que se necesita para llegar a su punto de ruptura es: PEF1-5> PEF1-10> PEF1-7.

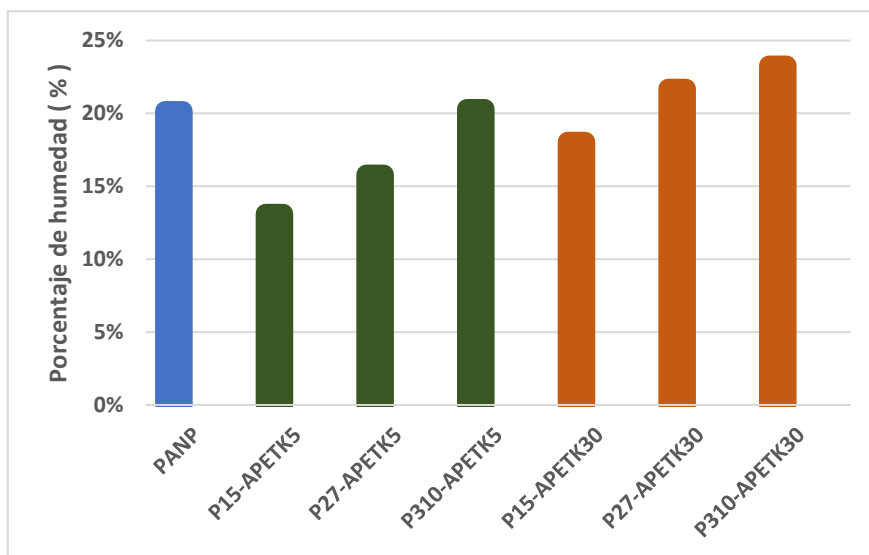
## Determinación de la humedad de las películas de almidón modificado

La humedad de las películas fue determinada acuerdo a la metodología propuesta. En las pruebas de humedad se obtuvieron los siguientes datos porcentuales de humedad de las películas, se seccionaron para su determinación y análisis del resultado. En la siguiente **Tabla 8** se muestra los resultados obtenidos:

**Tabla 8.** Valores porcentuales de humedad de las películas de almidón modificado.

Película	%ANP	%PETd	Porcentaje de humedad
PANP	100 %	0 %	20.15 %
P15-APETK5	95 %	5 %	13.11 %
P27-APETK5	93 %	7 %	15.80 %
P310-APETK5	90 %	10 %	20.30 %
P15-APETK30	95 %	5 %	18.05 %
P27-APETK30	93 %	7 %	21.69 %
P310-APETK30	90 %	10 %	23.28 %

Las películas que contiene la relación en masa arcilla PETd/K5 y PETd/K30= 5 fueron las películas que menor valor de humedad presentaron. A demás se observa que al aumentar el valor de la relación en masa PET/K30-K5 aumenta la cantidad de agua en la película Grafica 4.



**Gráfica 4.** Análisis de humedad de las biopelículas de almidón con PET degradado y arcillas.

La humedad en las películas es probable se deba a la disminución de los grupos hidroxilos que puedan captar agua del ambiente debido a que estos interaccionan con las arcillas.

## **10. Conclusión**

En conclusión, la degradación del PET con arcillas de motmorillonita fue llevada a cabo. Las condiciones adecuadas para la degradación fueron determinadas. El producto de degradación fue caracterizado por RMN y FTIR, lo que permitió proponer una estructura química de este. Las películas de almidón de plátano con el producto de degradación del PET fueron obtenidas. Estas películas fueron caracterizadas por FTIR y la determinación de sus propiedades mecánicas y humedad fueron determinadas. De acuerdo a los resultados obtenidos, estas películas tienen alto potencial para aplicarse en la industria del empaque, tomando como referencia la humedad, este parámetro nos indica que entre 13-18 % de humedad presenta un mayor porcentaje en la elasticidad.

## **11. Perspectivas**

- 1) Llevar a cabo el análisis de las películas por DRX para determinar la cristalinidad de las películas.
- 2) Llevar a cabo las pruebas de biodegradación de las películas para estimar la biodegradabilidad de las películas.

## 12. Bibliografía

- [1] Suasnavas F. (2017). *Degradación de materiales plásticos “PET” (polyethylene terephthalate), como alternativa para su gestión*. Pontificia Universidad Católica Del Ecuador Facultad De Ciencias Exactas Y Naturales.
- [2] Rodríguez-Alba E., et al., *La Ciencia de los Polímeros Biodegradables. XXVI Verano de la ciencia*. Vol. 10 ISSN 2395-9797 P. 1-15.
- [3] *Industria de plásticos y polímeros mexicana muestra resiliencia y repuntes en 2022*. (s/f). Cluster Industrial. Recuperado el 12 de junio de 2023, de <https://www.clusterindustrial.com.mx/noticia/5153/industria-de-plasticos-y-polimeros-mexicana-muestra-resiliencia-y-repuntes-en-2022>
- [4] Hernández, E. (2021, agosto 27). *Consumo de resinas en México supera 6 millones de toneladas en 2020: Anipac*. Forbes México. <https://www.forbes.com.mx/consumo-de-resinas-en-mexico-supera-6-millones-de-toneladas-en-2020-anipac/>
- [5] Santhana G.K.P y Kulkarni S. T. *Polyester resins*. Futura Polyesters Ltd, Cap. 1 p. 3-38.
- [6] Nisticó Roberto. *Polyethylene terephthalate (PET) in the packaging industry*. Polymer Testing 90 (2020). p. 1-18. doi.org/10.1016/j. polymertesting.2020.106707
- [7] Ji Li-na. *Study on Preparation Process and Properties of Polyethylene Terephthalate (PET)*. *Applied Mechanics and Materials Vol. 312 (2013)*. p 406-410 doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.312.406
- [8] Elias, X., & Jurado, L. Los plásticos residuales y sus posibilidades de valoración. *Reciclaje de residuos industriales*. Madrid: Dias de Santos S.A. (2012) p. 999-1007
- [10] Vassiliou A.A. et al., *In situ prepared PET nanocomposites: Effect of organically modified montmorillonite and fumed silica nanoparticles on PET physical properties and thermal degradation kinetics*. *Thermochimica Acta 500 (2010)*, p. 21–29. doi:10.1016/j.tca.2009.12.005

- [11] *Informe de mercado de botellas de PET.* (s/f). Mordorintelligence.com. Recuperado el 12 de junio de 2023, de <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/pet-bottles-market>
- [12] *PET becoming a valuable raw material in Mexico.* (s/f). Alpla.com. Recuperado el 12 de junio de 2023, de <https://blog.alpla.com/en/blog/recycling/pet-becoming-valuable-raw-material-mexico/01-22>
- [13] *Impacto de la contaminación por plásticos en la biodiversidad y patrimonio biocultural de México.* (s/f). Heinrich-Böll-Stiftung. Recuperado el 12 de junio de 2023, de <https://mx.boell.org/es/2021/03/10/impacto-de-la-contaminacion-por-plasticos-en-la-biodiversidad-y-patrimonio-biocultural>
- [14] Raju Francis. *Recycling of Polymers: Methods, Characterization and Applications.* John Wiley & Sons, 2016. ISBN: 978-3-527-33848-1
- [15] Grigore, M.E. *Methods of Recycling, Properties and Applications of Recycled Thermoplastic Polymers.* *Recycling* 2017, 2, 24. doi.org/10.3390/recycling2040024
- [16] Krishanu Ghosal, Chinmaya Nayak. Recent advances in chemical recycling of polyethylene terephthalate waste into value added products for sustainable coating solutions – hope vs. hype *Mater. Adv.*, 2022, 3, 1974–1992. DOI: 10.1039/d1ma01112j
- [17] Arratibel, A. J. (2023, enero 20). *El dilema de México y sus siete millones de toneladas de basura plástica.* Ediciones EL PAÍS S.L. <https://elpais.com/america-futura/2023-01-20/el-dilema-de-mexico-y-las-siete-millones-de-toneladas-de-plastico-que-acaban-en-la-basura-o-en-el-mar.html>
- [18] Beatriz Posada B. *La degradación de plasticos.* *Revista Universidad Eafit.* No. 94, p. 67-86.
- [19] de Lima A. Juliana, et al., *Degradation process of low molar mass poly(ethylene terephthalate)/organically modified montmorillonite nanocomposites: Effect on structure, rheological, and thermal behavior.* *Journal of Thermoplastic Composite Materials.* Vol. 1 (2015) p. 1-17.

**[20]** F. Cavani, F. Trifirò, A. Vaccari, Hydrotalcite-type anionic clays: Preparation, properties and applications., *Catalysis Today*, Volume 11, 1991, Pages 173-301. doi.org/10.1016/0920-5861(91)80068-K.

**[21]** Angelo Vaccari, Preparation and catalytic properties of cationic and anionic clays, *Catalysis Today*, Volume 41, 1998, Pages 53-71. doi.org/10.1016/S0920-5861(98)00038-8.

**[22]** Perla García-Guzmán, Luis Medina-Torres, Ma. Josefa Bernad-Bernad, Fausto Calderas, Octavio Manero, Study of the cholesterol adsorption and characterization of montmorillonite and bentonite clay, *Materials Today Communications*, Volume 35, 2023, 105604. doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105604.

**[23]** Park JH, Shin HJ, Kim MH, Kim JS, Kang N, Lee JY, Kim KT, Lee JI, Kim DD. Application of montmorillonite in bentonite as a pharmaceutical excipient in drug delivery systems. *J Pharm Investig.* 2016;46(4):363-375. doi: 10.1007/s40005-016-0258-8.

**[24]** U Flessner, D.J Jones, J Rozière, J Zajac, L Storaro, M Lenarda, M Pavan, A Jiménez-López, E Rodríguez-Castellón, M Trombetta, G Busca, A study of the surface acidity of acid-treated montmorillonite clay catalysts, *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, Volume 168, 2001, Pages 247-256. doi.org/10.1016/S1381-1169(00)00540-9.

**[25]** Tironi A. (2013). Materiales cementicios de baja energía. Activación térmica de arcillas, relación entre Estructura y actividad puzolánica. Universidad nacional de la plata Facultad de ciencias exactas Departamento de química.

**[26]** Motak Monika. *Montmorillonites modified with polymer and promoted with copper as DeNOx catalysts.* *Catalysis Today* Vol. 137 (2008) p. 247–252. doi:10.1016/j.cattod.2008.02.001

**[27]** Cañar B. y Pardo J. (2021). Obtención de una película de almidón dosificado con BHET catalizado con oxido de metales, mediante glicolisis de PET. Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, Carrera de Ingeniería Ambiental.

- [28] Centeno, S.R., Caracterización físico-mecánica de una película tipo foam elaborada a base de almidón de chayotextle, harina de plátano y fibra de madera. 2017.
- [29] Martínez, M.Á.O., Caracterización de películas comestibles de almidón de chayotextle adicionadas con microcápsulas. 2016.
- [30] Bi, Y., et al., Molecular Structure and Digestibility of Banana Flour and Starch. *Food Hydrocolloids*, 2017.
- [31] Hernández, A.R., Modificación química del almidón de plátano macho (musa paradisiaca l.) por la polimerización in situ de la  $\epsilon$ -caprolactona y el estudio de sus propiedades 2016.
- [32] Aldana, D.S., et al., Antibacterial activity of pectic-based edible films incorporated with Mexican lime essential oil. *Food control*, 2015. 50: p. 907-912.
- [33] Solano, A.C.V. and C.R. de Gante, Development of biodegradable films based on blue corn flour with potential applications in food packaging. Effects of plasticizers on mechanical, thermal, and microstructural properties of flour films. *Journal of Cereal Science*, 2014. 60(1): p. 60-66.
- [34] Hernández, O., U. Emaldi, and J. Tovar, In vitro digestibility of edible films from various starch sources. *Carbohydrate Polymers*, 2008. 71(4): p. 648-655.
- [35] A.A. Vassiliou, K. Chrissafis, D.N. Bikiaris, In situ prepared PET nanocomposites: Effect of organically modified montmorillonite and fumed silica nanoparticles on PET physical properties and thermal degradation kinetics, *Thermochimica Acta*, 500 (1-2), 21-29, 2010. doi.org/10.1016/j.tca.2009.12.005.
- [36] Aurelio Ramírez-Hernández, M. Valera-Zaragoza, A. Aparicio-Saguilan, J.C. Conde-Acevedo. Thermal behavior of banana starch films with degraded polyethylene terephthalate. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. Vol. 14, No. 2 (2015) 513-521

- [37] Ramírez-Hernández Aurelio, Navarro, L. G., Conde Acevedo, J. (2010). Degradación química del poli (etilen tereftalato). *Revista colombiana de química*, 39(3), 321-331.
- [38] García, K. E., Navarro, R., Ramírez-Hernández, A., & Marcos-Fernández, Á. (2017). New routes to difunctional macroglycols using ethylene carbonate: Reaction with bis-(2- hydroxyethyl) terephthalate and degradation of poly (ethylene terephthalate). *Polymer Degradation and Stability*, 144, 195-206.
- [39] Ramírez-Centeno Silvia, Marcos-Fernández Angel, Aparicio-Saguilán Alejandro, Navarro-Crespo Rodrigo, Ramírez-Hernández Aurelio, Báez-García José Eduardo, Delia Esther Páramo Calderón, Modification of banana starch (*Musa paradisiaca* L.) with polyethylene terephthalate: Virgin and bottle waste, *Carbohydrate Research*, 508, 2021, 108401. doi.org/10.1016/j.carres.2021.108401.
- [40] Maria Paraskevi Belioka, Mohammad Nahid Siddiqui, Halim Hamid Redhwi, Dimitris S. Achilias, Thermal degradation kinetics of recycled biodegradable and non-biodegradable polymer blends either neat or in the presence of nanoparticles using the random chain-scission model, *Thermochimica Acta*, Volume 726, 2023, 17954. doi.org/10.1016/j.tca.2023.179542.
- [41] Ramírez Hernández A., et al., *Degradación de poli (etilen tereftalato) con etilen carbonato e hidróxido de potasio*. Participación de la mujer en la ciencia. Vol. 1, p. 1-5. [https://congresos.cio.mx/memorias\\_congreso\\_mujer/archivos/extensos/sesion5/S5-BYQ08.pdf](https://congresos.cio.mx/memorias_congreso_mujer/archivos/extensos/sesion5/S5-BYQ08.pdf)
- [42] Zhou C. H, Keeling J. Fundamental and applied research on clay minerals: From climate and environment to nanotechnology. *Applied Clay Sci.* 2013;74:3-9.
- [43] Vdović N, Jurina I, Škapin S. D, Sondi I. The surface properties of clay minerals modified by intensive dry milling - revisited. *Applied Clay Sci.* 2010;48:575-580.
- [44] Sierra, N., Plazas, C., Guillén, L., & Rodríguez, P. (25 de Octubre de 2010). Protocolo para el control de calidad de envases de plástico, utilizados en la industria farmacéutica, de cosméticos y de alimentos: *Revista Colombiana de Ciencias Químico-Farmacéuticas*

[45] U Flessner, D.J Jones, J Rozière, J Zajac, L Storaro, M Lenarda, M Pavan, A Jiménez-López, E Rodríguez-Castellón, M Trombetta, G Busca, A study of the surface acidity of acid-treated montmorillonite clay catalysts, *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, Volume 168, 2001, Pages 247-256. doi.org/10.1016/S1381-1169(00)00540-9.

[46] J Madejová, FTIR techniques in clay mineral studies, *Vibrational Spectroscopy*, Volume 31, Issue 1, 2003, Pages 1-10. doi.org/10.1016/S0924-2031(02)00065-6.

[47] M. Hayati-Ashtiani (2012) Use of FTIR Spectroscopy in the Characterization of Natural and Treated Nanostructured Bentonites (Montmorillonites), *Particulate Science and Technology*, 30:6, 553-564, DOI: 10.1080/02726351.2011.615895

[48] Ziyu Chen, J.N. Hay, M.J. Jenkins, FTIR spectroscopic analysis of poly(ethylene terephthalate) on crystallization, *European Polymer Journal*, Volume 48, Issue 9, 2012, Pages 1586-1610. doi.org/10.1016/j.eurpo.

[49] U Flessner, D.J Jones, J Rozière, J Zajac, L Storaro, M Lenarda, M Pavan, A Jiménez-López, E Rodríguez-Castellón, M Trombetta, G Busca, A study of the surface acidity of acid-treated montmorillonite clay catalysts, *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, Volume 168,

[50] Ramírez-Centeno Silvia, Marcos-Fernández Angel, Aparicio-Saguilán Alejandro, Navarro-Crespo Rodrigo, Ramírez-Hernández Aurelio, Báez-García José Eduardo, Delia Esther Páramo Calderón, Modification of banana starch (*Musa paradisiaca* L.) with polyethylene terephthalate: Virgin and bottle waste, *Carbohydrate Research*, Volume 508, 2021. Doi.org/10.1016/j.carres.2021.108401.

[51] Karina Espinoza García, Rodrigo Navarro, Aurelio Ramírez-Hernández, Ángel Marcos-Fernández, New routes to difunctional macroglycols using ethylene carbonate: Reaction with bis-(2-hydroxyethyl) terephthalate and degradation of poly(ethylene terephthalate), *Polymer Degradation and Stability*, Volume 144, 2017, Pages 195-206, ISSN 0141-3910. doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2017.08.018.

**¡GRACIAS!**