



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**“DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE  
PARTÍCULA EN LA HIDRÓLISIS ALCALINA DEL  
POLIETILENTEREFTALATO (PET) POST CONSUMO”**

**Trabajo de Integración Curricular**

**Tipo:** Proyecto De Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERA QUÍMICA**

**AUTORA:** MISHHELL CAROLINA SÁNCHEZ ROJAS

**DIRECTOR:** Ing. PAÚL GUSTAVO PALMAY PAREDES M.Sc.

Riobamba – Ecuador

2021

© 2021, Mishell Carolina Sánchez Rojas

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Mishell Carolina Sánchez Rojas, declaro que el presente trabajo de integración curricular es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autora asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de integración curricular. El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 14 de septiembre del 2021

---

**Mishell Carolina Sánchez Rojas**

**171849853-6**

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

El Tribunal de Trabajo de Integración Curricular certifica que: El trabajo de Integración Curricular: Tipo: Proyecto de Investigación. **“DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA EN LA HIDRÓLISIS ALCALINA DEL POLIETILENTEREFTALATO (PET) POST CONSUMO”**, realizado por la señorita **MISHELL CAROLINA SÁNCHEZ ROJAS**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	<b>FIRMA</b>	<b>FECHA</b>
<p>Ing. César Arturo Puente Guijarro, PhD.</p> <p><b>PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</b></p>	 <hr/>	<p>2021-09-14</p>
<p>Ing. Paúl Gustavo Palmay Paredes, M.Sc.</p> <p><b>DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR</b></p>	 <hr/>	<p>2021-09-14</p>
<p>Ing. Linda Mariuxi Flores Fiallos, M.Sc.</p> <p><b>MIEMBRO DEL TRIBUNAL</b></p>	 <hr/>	<p>2021-09-14</p>

## **DEDICATORIA**

Por todo el amor, cariño, enseñanzas, apoyo y sobre todo los valores inculcados desde niña, el presente Trabajo De Integración Curricular es dedicado a mis padres, Laura y Pedro. A mis hermanos, Verónica y Fabián por ser un mi guía y siempre motivarme a poder cumplir uno de mis mayores sueños. A mis sobrinos, Anahí y Mateo, por siempre brindarme su inocencia y amor. En especial a Dios por permitirme obtener mi título académico

Mishell C.

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios por brindarme la valentía de estar lejos de mi hogar y sobre todo la sabiduría que me ha dado durante todos los años de la carrera universitaria lejos de mi hogar.

A mis padres Pedro y Laura, por su apoyo incondicional. Gracias por ser mi roca para edificar mi casa. El título es para ustedes.

A mis tíos, Eduardo y Esperanza (+) gracias por acogerme en su hogar. Toda mi vida estaré infinitamente agradecida.

A Richard, gracias por la paciencia y el tiempo brindado al enseñarme una de las cátedras más importantes de la carrera.

A mi amiga de toda la carrera, Michele, te agradezco por todo el esfuerzo y consejos que siempre nos hemos dado durante nuestra estadía por la Politécnica.

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por abrirme las puertas para poder estudiar mi carrera universitaria y en especial al Ingeniero Paúl Palmay e Ingeniera Linda Flores, gracias por el apoyo y guía para poder culminar con éxito una de mis etapas como estudiante.

Mishell C.

## TABLA DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE ECUACIONES .....	xii
ÍNDICE DE ANEXOS .....	xiii
RESUMEN .....	xiv
ABSTRACT.....	xv
INTRODUCCIÓN .....	1

## CAPÍTULO I

<b>1. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>3</b>
<b>1.1. Antecedentes de la investigación .....</b>	<b>3</b>
<b>1.2. Marco conceptual o glosario .....</b>	<b>4</b>
<b>1.2.1. Plásticos .....</b>	<b>4</b>
<b>1.2.1.1. Clasificación de los plásticos.....</b>	<b>4</b>
<b>1.2.1.2. Propiedades de los plásticos.....</b>	<b>8</b>
<b>1.2.1.3. Aditivos de los plásticos.....</b>	<b>9</b>
<b>1.2.2. PET .....</b>	<b>12</b>
<b>1.2.3. Reciclaje .....</b>	<b>15</b>
<b>1.2.3.1. Reciclaje Primario .....</b>	<b>16</b>
<b>1.2.3.2. Reciclaje Secundario .....</b>	<b>16</b>
<b>1.2.3.3. Reciclaje Terciario .....</b>	<b>16</b>
<b>1.2.3.4. Reciclaje cuartanario.....</b>	<b>21</b>
<b>1.2.4. Ácido tereftálico .....</b>	<b>22</b>

## CAPÍTULO II

<b>2. MARCO METODOLÓGICO.....</b>	<b>23</b>
<b>2.1. Objetivos .....</b>	<b>23</b>
<b>2.1.1. Objetivo General .....</b>	<b>23</b>
<b>2.1.2. Objetivos Específicos.....</b>	<b>23</b>
<b>2.2. Hipótesis y especificación de variables.....</b>	<b>23</b>
<b>2.2.1. Hipótesis general.....</b>	<b>23</b>
<b>2.2.2. Hipótesis específicas .....</b>	<b>23</b>
<b>2.2.3. Identificación de variables .....</b>	<b>24</b>

2.2.3.1.	<i>Variables independientes</i> .....	24
2.2.3.2.	<i>Variables dependientes</i> .....	24
2.2.4.	<b>Operacionalización de variables</b> .....	27
2.2.5.	<b>Matriz de consistencia</b> .....	30
2.3.	<b>Tipo y diseño de investigación</b> .....	32
2.3.1.	<i>Tipo de investigación</i> .....	32
2.3.2.	<i>Método deductivo</i> .....	32
2.3.3.	<i>Método inductivo</i> .....	32
2.3.4.	<i>Diseño experimental de la investigación</i> .....	32
2.3.4.1.	<i>Etapa uno</i> .....	32
2.3.4.2.	<i>Etapa dos</i> .....	33
2.3.4.3.	<i>Etapa tres</i> .....	33
2.4.	<b>Unidades de análisis</b> .....	36
2.5.	<b>Población de Estudio</b> .....	36
2.6.	<b>Tamaño de Muestra</b> .....	36
2.7.	<b>Selección de muestra</b> .....	36
2.8.	<b>Técnicas de recolección de datos</b> .....	37
2.8.1.	<b>Caracterización del plástico PET</b> .....	37
2.8.1.1.	<i>Test clásico de identificación de plásticos</i> .....	38
2.8.1.2.	<i>Espectroscopía infrarroja</i> .....	41
2.8.2.	<b>Hidrólisis alcalina del PET</b> .....	43
2.8.2.1.	<i>Rendimiento de la fracción sólida</i> .....	49
2.8.3.	<b>Análisis físico-químico de la fracción sólida NO Despolimerizada</b> .....	49
2.8.3.1.	<i>Espectroscopía Infrarroja FT-IR</i> .....	49
2.8.4.	<b>Análisis físico-químico de la fracción despolimerizada</b> .....	51
2.8.4.1.	<i>Espectroscopía Infrarroja FT-IR</i> .....	51
2.8.4.2.	<i>Pruebas de solubilidad</i> .....	53
2.8.4.3.	<i>Análisis estadístico</i> .....	55

### CAPÍTULO III

3.	<b>MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	57
3.1.	<b>Caracterización de la muestra de plástico</b> .....	57
3.1.1.	<i>Test clásico de identificación</i> .....	57
3.1.2.	<i>Espectroscopia infrarroja del plástico</i> .....	59
3.2.	<b>Resultados de la hidrólisis alcalina</b> .....	61
3.2.1.	<i>Fracción sólida NO Despolimerizada</i> .....	61

<b>3.2.2. Fracción sólida Despolimerizada</b> .....	64
3.2.2.1. Rendimiento del Proceso .....	64
3.2.2.1. Análisis Estadístico .....	67
3.2.2.2. Caracterización del ácido tereftálico .....	70
3.2.2.3. Prueba de solubilidad .....	72
<b>3.3. Pruebas de hipótesis</b> .....	73
3.3.1. <i>Hipótesis general</i> .....	73
3.3.2. <i>Hipótesis específicas</i> .....	73
3.3.2.1. <i>Hipótesis I</i> .....	73
3.3.2.2. <i>Hipótesis II</i> .....	73
3.3.2.3. <i>Hipótesis III</i> .....	75
<b>CONCLUSIONES</b> .....	76
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	77
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	
<b>ANEXOS</b>	

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-1:</b>	Código de reciclaje para resinas plásticas .....	4
<b>Tabla 2-1:</b>	Subdivisión de los termoplásticos .....	6
<b>Tabla 3-1:</b>	Propiedades de los plásticos .....	9
<b>Tabla 4-1:</b>	Características de los aditivos .....	10
<b>Tabla 5-1:</b>	Colorantes .....	11
<b>Tabla 6-1:</b>	Pigmentos orgánicos .....	11
<b>Tabla 7-1:</b>	Pigmentos Inorgánicos.....	12
<b>Tabla 8-1:</b>	Propiedades Químicas y Físicas del PET .....	13
<b>Tabla 9-1:</b>	Reactivos para la síntesis del PET.....	13
<b>Tabla 10-1:</b>	Requerimientos para el procesamiento de láminas.....	21
<b>Tabla 11-1:</b>	Propiedades físicas del Ácido Tereftálico .....	22
<b>Tabla 1-2:</b>	Operacionalización de las variables que intervienen en el proceso de hidrólisis alcalina.....	27
<b>Tabla 2-2:</b>	Matriz de consistencia.....	30
<b>Tabla 3-2:</b>	Densidad de algunos plásticos .....	39
<b>Tabla 4-2:</b>	Pruebas de solubilidad .....	54
<b>Tabla 1-3:</b>	Análisis del espectro IR del Plástico PET verde .....	60
<b>Tabla 2-3:</b>	Porcentaje de despolimerización.....	65
<b>Tabla 3-3:</b>	Rendimiento de la hidrólisis alcalina .....	65
<b>Tabla 4-3:</b>	Rendimiento promedio.....	66
<b>Tabla 5-3:</b>	FT-IR del Ácido Tereftálico .....	71

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-1.</b>	Categoría de los plásticos .....	6
<b>Figura 2-1.</b>	Estructura del plástico termoestable .....	7
<b>Figura 3-1.</b>	Enlace cruzado de cadenas .....	8
<b>Figura 4-1.</b>	Polimerización del polietileno .....	9
<b>Figura 5-1.</b>	Síntesis de bis(2-hidroxietilo) tereftalato .....	14
<b>Figura 6-1.</b>	Síntesis del Tereftalato De Polietileno .....	14
<b>Figura 7-1.</b>	Etapas para la síntesis del PET .....	15
<b>Figura 8-1.</b>	Reciclaje de botellas PET .....	16
<b>Figura 9-1.</b>	Reciclaje terciario .....	17
<b>Figura 10-1.</b>	Hidrólisis del PET .....	17
<b>Figura 11-1.</b>	Hidrólisis alcalina del PET .....	18
<b>Figura 12-1.</b>	Hidrólisis acida del PET .....	19
<b>Figura 13-1.</b>	Glicólisis catalizada del PET-post consumo .....	19
<b>Figura 14-1.</b>	Metanólisis del PET.....	20
<b>Figura 15-1.</b>	Aminólisis del PET.....	20
<b>Figura 16-1.</b>	Amonólisis del PET.....	21
<b>Figura 17-1.</b>	Ácido Tereftálico .....	22
<b>Figura 1-2.</b>	Hidrólisis alcalina .....	34
<b>Figura 2-2.</b>	Diseño Experimental .....	35
<b>Figura 3-2.</b>	Selección de muestra .....	37
<b>Figura 4-2.</b>	Plástico PET .....	38
<b>Figura 5-2.</b>	Numeración del plástico .....	38
<b>Figura 6-2.</b>	Caracterización de polímeros.....	39
<b>Figura 7-2.</b>	Espectro IR del Tereftalato de Polietileno .....	41
<b>Figura 8-2.</b>	Preparación de la muestra .....	44
<b>Figura 9-2.</b>	Despolimerización del PET .....	45
<b>Figura 10-2.</b>	Adición de agua destilada .....	45
<b>Figura 11-2.</b>	Primera filtración .....	46
<b>Figura 12-2.</b>	Precipitado.....	46
<b>Figura 13-2.</b>	Fracción sólida despolimerizada.....	47
<b>Figura 14-2.</b>	Procedimiento para la obtención de Ácido Tereftálico .....	48
<b>Figura 15-2.</b>	Ftalocianina .....	50
<b>Figura 16-2.</b>	Ftalocianina .....	50
<b>Figura 17-2.</b>	Quinacridona .....	51
<b>Figura 18-2.</b>	FTIR de la quinacridona .....	51

<b>Figura 19-2.</b>	Espectro FT-IR del Ácido Tereftálico estándar (-), Acido tereftálico obtenido de la despolimerización (-).....	52
<b>Figura 20-2.</b>	Espectro IR del Ácido tereftálico.....	52
<b>Figura 1-3.</b>	Test de agua.....	57
<b>Figura 2-3.</b>	Test de Beilstein (Plástico verde) .....	58
<b>Figura 3-3.</b>	Test de Beilstein (Plástico rosado).....	58
<b>Figura 4-3.</b>	Test de acetona .....	58
<b>Figura 5-3.</b>	Test de ácido Sulfúrico .....	59
<b>Figura 6-3.</b>	FT-IR Plástico verde.....	59
<b>Figura 7-3.</b>	FT-IR Plástico Rosado.....	61
<b>Figura 8-3.</b>	Fracción NO Despolimerizada.....	61
<b>Figura 9-3.</b>	Pigmento Verde .....	62
<b>Figura 10-3.</b>	Pigmento Rosado .....	62
<b>Figura 11-3.</b>	Ácido Tereftálico .....	64
<b>Figura 12-3.</b>	Rendimiento de la hidrólisis alcalina .....	66
<b>Figura 13-3.</b>	Análisis Anova .....	68
<b>Figura 14-3.</b>	Test Tukey.....	69
<b>Figura 15-3.</b>	Gráfica Test de Tukey (Interacción) .....	69
<b>Figura 16-3.</b>	Espectro IR del Ácido Tereftálico .....	70
<b>Figura 17-3.</b>	Solubilidad del Ácido Tereftálico .....	72
<b>Figura 18-3.</b>	Test Tukey: Diámetro de partícula.....	74
<b>Figura 19-3.</b>	% Despolimerización vs Diámetro .....	75

## ÍNDICE DE ECUACIONES

<b>Ecuación 1-2:</b>	Porcentaje de despolimerización .....	49
<b>Ecuación 2-2:</b>	Porcentaje de Rendimiento.....	49

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

**ANEXO A:** Selección de materia prima

**ANEXO B:** Pigmento a analizar en el FT- IR

**ANEXO C:** Caracterización del ácido tereftálico

**ANEXO D:** Cálculo para el porcentaje de despolimerización y rendimiento

**ANEXO E:** Pigmentos

## RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo el identificar el efecto que provoca el tamaño del pellet del plástico sobre el porcentaje de rendimiento obtenido de la hidrólisis alcalina, el tipo de plástico tomado como muestra fue el tereftalato de polietileno muestreado dentro de las instalaciones de la ESPOCH. Los dos tamaños de partícula empleados fueron de 10mm y 5mm, además de ello también se ha empleado dos tipos de colores de plástico, rosado y verde. La hidrólisis alcalina se desarrolló a escala de laboratorio con materiales de uso frecuente. Las condiciones del reciclaje químico fueron: T° 120 °C, 5g de plástico, 5g de hidróxido de sodio, 20mL de agua y 20mL de etilenglicol durante 30 minutos con agitación constante, obtenido como producto final un polvo fino blanquecino. Para caracterizar el monómero se ha empleado la técnica de espectroscopia infrarroja y prueba de solubilidad, corroborando así las propiedades del ácido tereftálico. El mejor porcentaje promedio de la despolimerización fue de 96.11%, el mismo se obtuvo con color del plástico (verde) y tamaño de partícula (5mm), para el porcentaje más bajo correspondiente a un porcentaje promedio de 85,89% se obtuvo con el plástico rosado y diámetro de 10mm. La justificación de la selección de dichas condiciones se basa en que, mientras más pequeño sea el pellet, mayor posibilidad tendrá la base para interactuar con las moléculas del Polietilentereftalato (PET). Por otra parte, el pigmento detecto para ambos colores corresponde a las familias de las quinacridona y ftalocianinas, ambos compuestos aromáticos poseen carbonos electrofílicos que impiden el ataque directo de la base hacia las moléculas del PET, ocasionando así un menor rendimiento. Se recomienda continuar con futuras investigaciones relacionadas al reciclaje de plásticos involucrando para ello nuevas condiciones.

**Palabras clave:** <INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA QUÍMICA><PLÁSTICO>  
<MONÓMERO> <ÁLCALI> <DIÁMETRO> <COLORES DE PLÁSTICO> <HIDRÓLISIS ALCALINA>

Firmado digitalmente por LUIS ALBERTO CAMINOS VARGAS  
Nombre de reconocimiento (DN): c=EC, I=RIOBAMBA, serialNumber=0602766974, cn=LUIS ALBERTO CAMINOS VARGAS  
Fecha: 2021.03.17 10:42:17 -05'00'

LUIS ALBERTO  
CAMINOS  
VARGAS



0774-DBRAI-UPT-2021

## ABSTRACT

The objective of this study was to identify the effect caused by the size of the plastic pellet on the percentage of yield obtained from alkaline hydrolysis. The plastic sample was polyethylene terephthalate sampled within the ESPOCH facilities. The two-particle sizes used were 10mm and 5mm, in addition to this, two types of plastic colours were also used, pink and green. Alkaline hydrolysis was developed on a laboratory scale with commonly used materials. The chemical recycling conditions were  $T = 120^{\circ}C$ , 5g of plastic, 5g of sodium hydroxide, 20mL of water and 20mL of ethylene glycol for 30 minutes with constant stirring, as a final product a fine whitish powder was obtained. To characterize the monomer, the infrared spectroscopy technique and solubility test were used, thus corroborating the properties of terephthalic acid. The best average percentage of depolymerization was 96.11%. It was obtained with plastic colour (green) and particle size (5mm), for the lowest percentage referring to an average percentage of 85.89% was obtained using the 10mm diameter pink plastic. The justification for the selection of these conditions is based on the fact that the smaller the pellet, the greater the possibility of the base interacting with the Polyethylene Terephthalate (PET) molecules. On the other hand, the pigment detected in both colours corresponds to the quinacridone and phthalocyanine families, both aromatic compounds have electrophilic carbons that prevent the direct attack of the base towards the PET molecules, thus causing a lower yield. It is recommended to continue with future research related to plastic recycling involving new conditions.

**Keywords:** <ENGINEERING AND CHEMICAL TECHNOLOGY> <PLASTIC>  
<MONOMER> <ALKALI> <DIAMETER> <PLASTIC COLORS> <ALKALINE  
HYDROLYSIS>

## INTRODUCCIÓN

El tereftalato de polietileno es un termoplástico comúnmente usado para la elaboración de botellas carbonatadas como gaseosas y refrescos, envases cosméticos, bandejas para ensaladas, bolsas para alimentos, e/o. El principal inconveniente del uso de los plásticos radica desde la elaboración de los mismos, con 24 millones de galones de petróleo tan solo se puede obtener 1000 millones de botellas (Varela, 2018, p.40).

Para la fabricación de plásticos se emplean dos procesos la polimerización y la policondensación. El tiempo de degradación de los plásticos es de centenares de años debido a las fuerzas de los enlaces químicos que mantiene unidas a las moléculas, las botellas de PET necesitan más de 100 años para degradarse por completo (Bui, Satomi y Takahashi, 2018, p.80).

Los pigmentos utilizados para los plásticos en las grandes industrias son empleados para tres acciones básicas: decoración, identificación y publicidad. En comparación con los tintes, los pigmentos son los preferidos para la coloración de los plásticos debido a sus propiedades de resistencia que presenta (Al-Malaika et al., 2017, p.143).

La basura plástica en mares y océanos al estar en contacto con la radiación UVB de la luz solar, así como también debido a las propiedades oxidativas de la atmosfera e hidrolíticas del agua mar, hacen que el plástico se rompa en pequeños trozos. La contaminación por plástico tiene una gran incidencia económica, social y medioambiental. Tanto así que, incluso en el año 2018 en un estudio realizado por la Agencia Austriaca Del Medio Ambiente, se han encontrado residuos de plástico tipo PET y PP en heces humanas (Tessnow-von Wysocki y Le Billon, 2019, p.97).

En el año 2019 en la zona costera del Ecuador se recolectaron alrededor de 500 toneladas de plástico, de los cuales el 36% pertenece a botellas de agua desechables. De los 17 millones de Ecuatorianos tan solo el 52,3% clasifica a los residuos de desecho (Naranjo, 2019, párr.4).

Debido a la alta demanda comercial del plástico y en particular del PET se busca alternativas para el minimizar la problemática. Por lo tanto, ha surgido la idea de reutilizar los productos derivados del PET. Una de las mejores opciones es el reciclaje químico, en el cual, se da la degradación del plástico mediante la temperatura y/o uso de catalizadores originando así monómeros que posteriormente podrán ser reutilizados. Existe una amplia clasificación de los métodos empleados para el reciclaje químico, entre los cuales se tiene: metanólisis, glicólisis, hidrólisis, aminólisis, amonólisis.

Con la hidrólisis alcalina se obtiene como derivado principal el ácido tereftálico, el cual dentro de las industrias es empleado para la síntesis de varios productos, además de su importancia económica. Por citar algunos ejemplos, se tiene: fibras de poliéster, síntesis de kevlar y además para la fabricación de otras botellas de PET. El tamaño de partícula es uno de los factores que influye en el reciclaje químico.

Con lo detallado en el párrafo anterior, se promueve el reciclaje químico como una alternativa, socio ambiental y económica que puede ser desarrolla a pequeña o gran escala. Justificando la premisa con la nueva *“La Ley Orgánica para la Racionalización, Reutilización y Reciclaje de Plásticos de un solo uso”*, en la cual se señala que el Ecuador promueve el fabricar nuevos plásticos con porcentaje de reciclaje del 5, 15 y 30% acorde a dicha ley

El cambio de desechar por reciclar puede convertirse en un gigantesco cambio para el mundo.

## CAPÍTULO I

### 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

#### 1.1. Antecedentes de la investigación

El plástico tipo PET es considerado como uno de los termoplásticos más comunes empleados en la industria de envasado y textilería, por lo general es un plástico transparente semicristalino. Sin embargo, al añadir aditivos, los plásticos llegan a presentar diferentes presentaciones. Uno de los aditivos principales más estables de los plásticos son los pigmentos inorgánicos, además de que posee una buena resistencia al exterior y a la química. Los iones metálicos libres son catalizadores de la oxidación, por lo que se debe tener cuidado con los plásticos (Sang et al., 2020, p.1).

Para la fabricación de plásticos se utiliza aproximadamente entre 4% y 8% de la producción mundial de petróleo, los niveles antes mencionados son muy parecidos a los empleados en el sector de la aviación. Se prevé que para el año 2050, la industria de los plásticos llegará a consumir aproximadamente el 20% de la producción de petróleo. Aproximadamente 407 millones de toneladas de plástico fueron producidos por todo el mundo en el año 2015 y 302 millones de toneladas de plásticos se desecharon como residuos (Hurihuri, 2019, p.8).

En términos de cantidad, el tereftalato de polietileno (PET) es el polímero comúnmente empleado por todo el mundo debido a sus grandes aplicaciones tanto en la industria textil como de embalaje, ya que presenta muy buenas propiedades físicas y químicas, entre las cuales se destacan: resistencia a la tracción, resistencia química, económico, e/o. El TPA es un agente químico empleado como un tipo de aditivo para la mezcla del cemento (Kandasamy et al., 2020, p.1).

El reciclaje de plásticos consta de un sistema de tratamiento distribuido en cuatro categorías, las cuales son descritas a continuación: *tratamiento primario o re-extrusión*, aquí se desarrollan operaciones y procesos que buscan obtener un producto final. El *tratamiento secundario*, se desarrolla mediante operaciones mecánicas a fin de obtener productos con propiedades y características diferentes a las del plástico original. En *el tratamiento terciario o reciclaje químico*, se descompone por medio de procesos químicos. En *el tratamiento cuaternario o también llamado de “recuperación de energía”*, se busca que los plásticos se puedan usar como combustible para la incineración (Méndez, 2020).

De acuerdo al principio del “Desarrollo Sostenible” el reciclaje químico se ha convertido en una de las estrategias más convenientes para el tratamiento de los plásticos post-consumo. El reciclaje químico constituye diferentes vías, tales como: la hidrólisis, metanólisis, glucólisis y amonólisis. Específicamente en la hidrólisis, se obtiene como producto de la despolimerización el ácido tereftálico y etilenglicol, en condiciones ácidas, básicas o neutras (Singh et al., 2018, p.5804).

De acuerdo a la realización experimental y posterior análisis de (Singh et al., 2018, p.2) se degrada el plástico PET a través de tres reactivos químicos, los cuales son: NaOH, agua y etilenglicol. La condición básica empleada es el tiempo de reacción de 25 minutos a 200°C con un rendimiento máximo de 92 %.

De igual manera según (Kandasamy et al., 2020, p.3) han empleado condiciones leves para despolimerizar el plástico. La hidrólisis alcalina es uno de los métodos más empleados para el reciclaje químico, para lo cual se han empleado condiciones de 100°C a 35 minutos variando la masa del PET y del NaOH, obteniendo consecuentemente rendimientos desde el 88% al 93%

El reciclaje químico, tema que se desarrollará en el presente trabajo, se basa en despolimerizar al polímero para obtener los monómeros del plástico. Se desarrollará un tratamiento terciario, hidrólisis alcalina del PET, con plástico de color rosado y verde, los mismos que serán sometidos a un proceso de degradación obteniendo como producto final TPA.

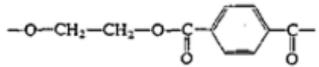
## 1.2. Marco conceptual o glosario

### 1.2.1. Plásticos

La palabra plástico proviene el griego "*plásticos*", cuyo significado es "apto para moldear". Es un material polimérico que posee la destreza de poder ser moldeado, por lo general a través de la aplicación de calor y presión. La propiedad de plasticidad conjuntamente en combinación con propiedades especiales, tales como: baja densidad, baja conductividad eléctrica, transparencia y tenacidad, hacen que los plásticos se conviertan en una gran variedad de productos. Entre algunos ejemplos son: botellas de bebidas resistentes y livianas fabricadas con tereftalato de polietileno (PET), mangueras de jardín elaboradas con cloruro de polivinilo (PVC), recipientes aislantes alimenticios hechos con poliestireno espumado, e/o (Rodríguez, 2020, p.1).

#### 1.2.1.1. Clasificación de los plásticos

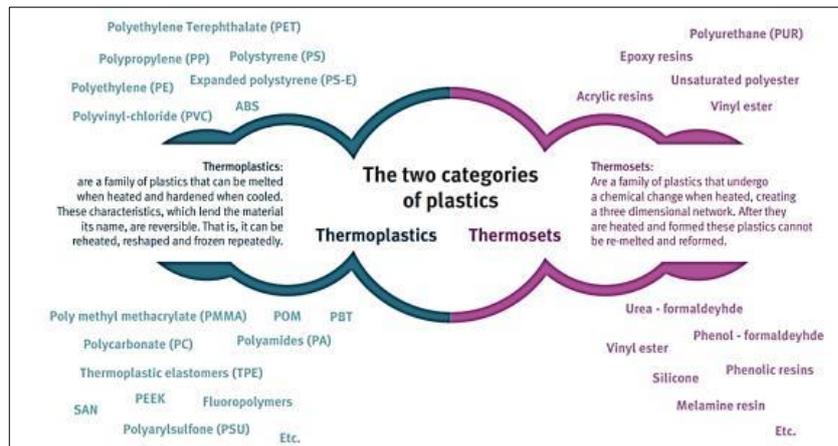
**Tabla 1-1:** Código de reciclaje para resinas plásticas

Código de reciclaje	Polímero y estructura	Usos
	 <p>Poli (tereftalato de etileno) (PET)</p>	Botellas de refrescos, agua y jugos.

 <b>HDPE</b>	$-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$ <p>Polietileno de alta densidad</p>	Botellas exprimibles y botellas para leche
 <b>V</b>	$-\text{CH}_2-\underset{\text{Cl}}{\text{CH}}-\text{CH}_2-\underset{\text{Cl}}{\text{CH}}-$ <p>Cloruro de vinilo / polivinilo</p>	Frascos destinados para materiales de limpieza y botellas de shampoo
 <b>LDPE</b>	$-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$ <p>Polietileno de baja densidad Puede tener algunas ramas</p>	Bolsas y envolturas de plástico
 <b>PP</b>	$-\text{CH}_2-\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}-\text{CH}_2-\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}-$ <p>Polipropileno</p>	Contenedores de yogurt, mantequilla recipientes para microondas, botellas de medicamentos y cosméticos, tapas de botellas, sorbetes, tuberías, válvulas, sogas, etc.
 <b>PS</b>	$-\text{CH}_2-\underset{\text{C}_6\text{H}_5}{\text{CH}}-\text{CH}_2-\underset{\text{C}_6\text{H}_5}{\text{CH}}-$ <p>Poliestireno</p>	Vaso, juguetes, aparatos electrónicos, cajas de CD, cartuchos de cintas de video, perchas.
 <b>Other</b>	Resinas sobrantes, multimateriales estratificados, plásticos no mencionados anteriormente: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Poliuretano (PU)</li> <li>• Acrilonitrilobutadieno-estireno (ABS)</li> <li>• Policarbonato (PC)</li> <li>• Resina acetal</li> </ul>	Botellas de salsa de tomate, paquetes de panecillos, piezas vehiculares

Fuente: Plastic Europe, 2017, p.9.

Realizado por: Sánchez, M.2021.



**Figura 1-1.** Categoría de los plásticos

Fuente: Plastic Europe, 2017, p.9.

## Termoplásticos

A los termoplásticos es posible moldear y remodelar; además cuando son calentados, estos plásticos se ablandan. En la estructura del polímero termoplástico, las moléculas individuales que se encuentran separadas entre sí, fluyen unas sobre las otras. En cuanto al peso molecular, este puede ser muy alto o bajo y su estructura puede ser ramificada o lineal. Sin embargo, lo que les caracteriza es la separabilidad y movilidad. Un ejemplo de termoplástico es el polietileno y el poliestireno. A partir de una taza fabricada con poliestireno espumado se puede obtener un nuevo artículo, por ejemplo, un plato. Simplemente con la acción de calentar y remodelar el plástico (Rodríguez, 2020, párr.4).

Una subdivisión de los termoplástico está relacionada con la estructura, ya sea cristalina (ordenada) o amorfa (aleatoria), las características de los mismo se detallada a continuación:

**Tabla 2-1:** Subdivisión de los termoplásticos

Amorfo	Cristalino
<p><b>Rango de ablandamiento</b></p> <p>Los enlaces secundarios débiles se desordenan debido a la agitación térmica. Por lo tanto, se obtiene un rango amplio de temperaturas para suavizar la estructura sin forma.</p>	<p><b>Punto de fusión</b></p> <p>La estructura regular permite que la mayoría de los enlaces secundarios se separen al mismo tiempo. Consecuentemente se tiene un punto de fusión cristalino agudo.</p>
<p><b>Usualmente transparente</b></p> <p>La estructura más libre permite que la luz pase permitiendo así que el material parezca transparente.</p>	<p><b>Usualmente opaco</b></p> <p>La diferencia entre los índices de refracción de las dos fases (amorfos - cristalino) provoca interferencias para que el material parezca opaco</p>

<b><i>Baja resistencia química</i></b>	<b><i>Alta resistencia química</i></b>
La estructura aleatoria hace posible que los productos químicos puedan ingresar en el material y romper enlaces secundarios.	La estructura sólida impide el ataque químico en el material.

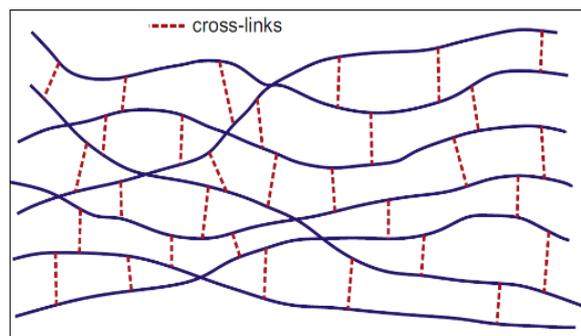
Fuente: Crawford,R.;Martin,P, 2020, pp.16-17.

Realizado por: Sánchez, M.2021.

Plásticos como el polietileno y el nylon, pueden llegar a poseer un alto grado de cristalinidad, otros plásticos como el poliestireno son amorfos.

## Termoestables

Los plásticos termoestables sufren una transformación química que convierte dicho plástico en una especie sólida, creando una red tridimensional. Después de ser calentados, es muy complicado que los plásticos termoestables se puedan reciclar debido a que no es posible fundir ni remodelar. Si se aplica calor en exceso a estos materiales, se carbonizarán y degradarán. Entre los ejemplos de plásticos termoestables se tiene a las resinas de poliuretano y epoxi (Hurihuri, 2019, p.8).

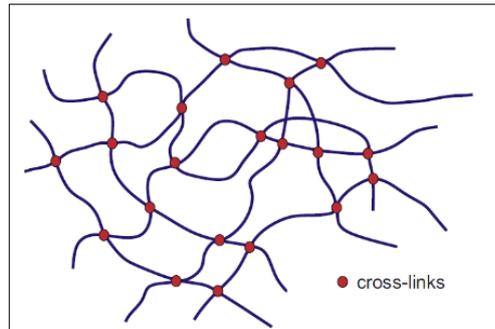


**Figura 2-1.** Estructura del plástico termoestable

Fuente: Crawford,R.;Martin,P, 2020, p.18.

## Elastómeros

Los elastómeros son un tipo de polímero que estructuralmente posee cadenas retorcidas con enlaces cruzados, esta distribución da la posibilidad de tener una deformación elástica. Es decir, este tipo de polímero puede volver a tomar su forma inicial después de haber sufrido alguna deformación como consecuencia de la aplicación de una fuerza y/o temperaturas altas. Al adicionar azufre se puede optimizar las propiedades de los elastómeros (Cruz, Blanco y Guerra, 2019, p.6).



**Figura 3-1.** Enlace cruzado de cadenas en un elastómero.

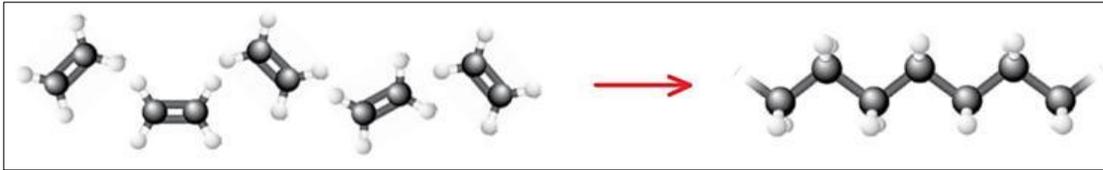
**Fuente:** Crawford,R.;Martin,P, 2020, p.16.

Los elastómeros termoplásticos son un tipo de material polimérico que presenta elasticidad de caucho a temperatura ambiente y se puede plastificar a altas temperaturas. Es por ello que, los elastómeros poseen características de las gomas termoestables y termoplásticas. En cuanto a las características estructurales, las cadenas del polímero están conectadas en serie con algunos segmentos del plástico químicamente diferentes conocidos como “segmentos duros” y segmentos de caucho o segmentos blandos. Algunos ejemplos de las gomas sintéticas o elastómeros son: caucho de estireno-butadieno (SBR), Caucho de etileno-propileno y neopreno (Dai et al., 2020, p.1).

#### *1.2.1.2. Propiedades de los plásticos*

Entre las propiedades más importantes de los termoplásticos se tiene: alto peso molecular, baja densidad, resistencia a la corrosión además de poseer una baja conductividad térmica y eléctrica. Es por tanto que, los plásticos son cotizados por todo tipo de industria siendo así que, incluso existen plásticos con un gran poder de resistencia al calor y a la tracción, cuyos valores se encuentran muy cercanos al acero. Los termoplásticos tienen un comportamiento viscoelástico (posee una reacción viscosa y elástica) dicha deformación se debe la estructura molecular de cadena larga. Aquellos plásticos con enlaces débiles se deforman fácilmente en comparación a aquellos con enlaces fuertes (PlasticsEurope, 2020).

Los polímeros que componen los plásticos son cadenas moleculares muy largas enlazadas por subunidades repetitivas cortas en un proceso químico conocido como “polimerización”. Las propiedades físicas de estas cadenas de moléculas extremadamente largas, flexibles e interrelacionadas dan a muchos plásticos su fuerza y flexibilidad (Hurihuri, 2019, p.8).



**Figura 4-1.** Polimerización del polietileno

Fuente: Te Ao., Hurihuri. 2019, p.5.

**Tabla 3-1** Propiedades de los plásticos

PROPIEDADES	DESCRIPCIÓN
<b>Resistencia al ataque químico</b>	Esta propiedad depende de los grupos funcionales presentes en cada monómero. Por ejemplo, las poliolefinas poseen enlaces C-C y C-H, los cuales son resistentes a bases, ácidos y disolventes
<b>Solubilidad</b>	Los plásticos termoestables no se pueden solubilizar debido a que no es factible el poder separar las cadenas entrecruzadas.
<b>Resistencia al envejecimiento</b>	Debido al efecto entre el calor, la luz solar y oxígeno, los plásticos son susceptibles a la oxidación térmica y fotoquímica. La degradación es provocada por la formación de los radicales libres, aquellos polímeros cristalinos son más resistentes que los polímeros amorfos.
<b>Estabilidad térmica</b>	El calor provoca cambios químicos diversos, tales como: despolimerización, reacciones de eliminación, fragmentación además de reacciones de los grupos funcionales, dichos factores provocan que los enlaces débiles disminuyan su resistencia térmica
<b>Propiedades ópticas</b>	Entre las propiedades ópticas se tiene: la transmisión de la luz, índice de refracción la cual influye en la transparencia, brillo y turbidez. La estructura cristalina de los polímeros interfiere en el paso de la luz ocasionando turbidez.

Fuente: Al-Malaika et al., 2017.

Realizado por: Sánchez, M.2021.

### 1.2.1.3. Aditivos de los plásticos

A los polímeros de los plásticos convencionales se puede adherir “aditivos” para modificar el carácter de los mismos. Los aditivos facilitan que los plásticos adquieran una amplia variedad de apariencias, rendimiento y durabilidad, de la misma manera el comportamiento frente al medio ambiente es diferente. Entre los aditivos más comunes se tiene: plastificantes (flexibilidad y durabilidad), bloqueadores ultravioleta, estabilizadores térmicos, colorantes, pigmentos y retardantes de llama. Muchas de las veces, en cantidades mínimas, los aditivos son tóxicos (Hurihuri, 2019, p.8).

**Tabla 4-1:** Características de los aditivos

<b>Ord.</b>	<b>Características</b>
<b>1</b>	No ser tóxicos ni emanar sabor u olor.
<b>2</b>	No deben afectar negativamente a las propiedades del polímero.
<b>3</b>	Económicos
<b>4</b>	Deben ser estables durante el procesamiento
<b>5</b>	No debe dar paso a la floración.

**Fuente:** Al-Malaika et al., 2017, p.127.

**Realizado por:** Sánchez, M.2021.

La floración está asociada con la solubilidad. Dicho fenómeno se presenta cuando el aditivo se ha disuelto completamente en el polímero a la temperatura de procesamiento. Sin embargo, sólo es soluble a temperatura ambiente. Por lo general, la floración es causada por una errónea dosificación de los componentes de la formulación, largo tiempo de almacenamiento en condiciones climáticas desfavorables, el uso de aditivos que son incompatibles ya sea con el polímero o incluso con otros aditivos (TASCON, 2020, p.1).

### **Plastificantes y suavizantes**

Entre los componentes principales de un producto plástico se tiene: 58% plastificantes, 3% estabilizadores de calor, 8% FRs, 9% agentes soplantes, 12% colorantes y 7% otros. Los plastificantes son empleados en una variedad de polímeros, tales como: polímeros acrílicos, acetato de polivinilo, PVC (Hassanpour y Unnisa, 2017, p.2).

### **Lubricantes**

Los lubricantes frecuentemente se emplean para describir ciertos aditivos que son adheridos a materiales plásticos. Existen varios tipos de lubricantes y entre los más importantes se tienen aquellos materiales que reducen la fricción de las molduras cuando son frotados con otros materiales de la misma o diferente composición y aquellos materiales que durante la fabricación del polímero exudan hasta la interfaz entre el polímero y las superficies metálicas, consecuentemente la película ayuda a impedir la composición del plástico se fije en la maquinaria (Al-Malaika et al., 2017, p.150).

## Colorantes

**Tabla 5-1:** Colorantes

Aditivo para la coloración	Descripción
<b>Tinte</b>	Es un tipo de colorante que es soluble en el polímero, además resulta en un atrayente color transparente brillante cuando la pieza de plástico está en uso.
<b>Pigmento</b>	Por lo general no son solubles en los polímeros, más bien se dispersan en el plástico para absorber y dispersar la luz que interactúa con las partículas de pigmento, de esta manera se emite un color dependiendo de la fuente de luz.
<b>Pigmento inorgánico</b>	Son partículas de mayor tamaño y poseen mayor facilidad para dispersarse en los plásticos, poseen una buena capacidad de opacidad, buena resistencia al color. Aunque, tienden a ser débiles una vez añadido dióxido de titanio u otros pigmentos blancos.
<b>Pigmento orgánico</b>	Tienen la capacidad de brindar colores brillantes en plásticos, además poseen buena resistencia al color incluso cuando se tiñen de pigmentos blancos. Dependiendo de la química de los pigmentos orgánicos varía la luz y la estabilidad térmica.

**Fuente:** Edmondson,S.; Gilbert,M. 2017.

**Realizado por:** Sánchez, M.2021.

Para la percepción del color del plástico existen tres factores que influyen, los cuales son: la fuente de luz, el objeto y el observador. El color percibido cambia si cualquiera de los factores mencionados cambia. El metamerismo es un término importante a considerar durante la fabricación de plásticos. La palabra metamerismo se emplea cuando existen dos objetos que presentan un color similar bajo ciertas condiciones. Sin embargo, dicha similitud desaparece cuando es comparada con otras condiciones como: la iluminación, observador y el ángulo de visión (Al-Malaika et al., 2017, p.143).

Industrialmente se emplea la coloración de los plásticos con fines publicitarios, identificación y decoración. Algunos de los métodos empleados para la coloración de plásticos son la impresión o recubrimiento superficial, chapado metálico, película decorativa e incorporación de aditivos colorantes a la masa del polímero (Edmondson y Gilbert, 2017).

**Tabla 6-1:** Pigmentos orgánicos

Color	Número de Pigmento (Color Index)	Composición química
Verde	Pigmento verde 7	Ftalocianinas
	Pigmento verde 36	
Violeta	Pigmento violeta 19	Quinacridona (Estable y aprobado para el uso en alimentos)
	Pigmento violeta 23	Carbazol
	Pigmento violeta 37	
	Pigmento violeta 29	Perileno

**Fuente:** Chirayil,T.; Rediske,J. 2016, p.301.

**Realizado por:** Sánchez, M.2021.

**Tabla 7-1: Pigmentos Inorgánicos**

Color	Número de Pigmento (Color Index 1982)	Composición Química	Comentarios
<b>Blanco</b>	Pigmento blanco 6	Dióxido de titanio	Pigmento blanco más común
<b>Blanco</b>	Pigmento blanco 7	Coprecipitado de sulfuro de zinc y sulfato de bario	Litopón (pigmento natural de óxido de zinc no tóxico)
<b>Negro</b>	Pigmento negro 7	Negro carbón	2% del mercado de los plásticos
<b>Negro</b>	Pigmento negro 11	Óxido de hierro negro	Se oxida a $\geq 180^{\circ}\text{C}$ , pigmento débil
<b>Negro</b>	Pigmento negro 22	Spinel Black (espinela de hierro manganeso)	Pigmento de color inorgánico complejo
<b>Negro</b>	Pigmento negro 27	Spinel Black	Pigmento de color inorgánico complejo
<b>Rojo</b>	Pigmento rojo 101	Óxido de hierro	
<b>Rojo</b>	Pigmento rojo 104	Molibdato de naranja	Pigmento de metal pesado
<b>Rojo</b>	Pigmento rojo 108	Sulfoseleniuro de cadmio	Pigmento de metal pesado
<b>Rojo</b>	Pigmento rojo 265	Sulfuro de selenio	Pigmento de metal pesado
<b>Amarillo</b>	Pigmento amarillo 35	Sulfoseleniuro de cadmio	Pigmento de metal pesado
<b>Amarillo</b>	Pigmento amarillo 53	Titanato de níquel	Pigmento de color inorgánico complejo
<b>Amarillo</b>	Pigmento amarillo 184	Vanadato de Bismuto	
<b>Verde</b>	Pigmento verde 17	Óxido de cromo	
<b>Verde</b>	Pigmento verde 50	Cobalto verde	Pigmento de color inorgánico complejo
<b>Azul</b>	Pigmento azul 29	Pigmento ultramarino	
<b>Azul</b>	Pigmento azul 36	Azul cobalto	Pigmento de color inorgánico complejo
<b>Violeta</b>	Pigmento violeta 15	Pigmento ultramarino	
<b>Violeta</b>	Pigmento violeta 23	Dioxacina	

Fuente: Al-Malaika et al., 2017, p.147.

Realizado por: Sánchez, M.2021.

### 1.2.2. PET

El tereftalato de polietileno o poli (tereftalato de etileno) es una de las resinas termoplásticas semicristalinas más abundantemente, además que es la única fibra y película de polímero saturado de importancia comercial. PET es empleado para las fibras de ropa y contenedores de alimentos; posee una óptima propiedad mecánica tal como: resistencia a la tracción, buena propiedad de barrera contra el oxígeno, dióxido de carbono, compuesto aromático, e/o (Mandal y Dey, 2019, pp.2-9).

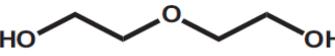
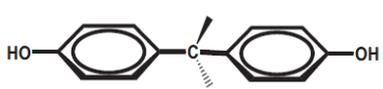
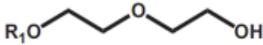
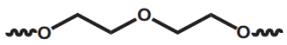
**Tabla 8-1:** Propiedades Químicas y Físicas del PET

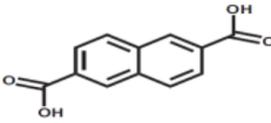
ORD.	Descripción
1	No es muy pesado, además de que tiene una apariencia transparente
2	Buena resistencia química
3	Presenta óptimas propiedades eléctricas
4	Resistencia al envejecimiento térmico
5	Estabilidad al calor
6	Resistencia al desgaste
7	Económico y fácil fabricación

Fuente: Mandal,S.; Dey,A. 2019, p.2.

Realizado por: Sánchez, M.2021.

**Tabla 9-1:** Reactivos para la síntesis del PET

Tipo	Molécula	Estructura de la molécula	Propiedad
<b>Diol</b>	Etilenglicol		Formación de fibras de PET
	Dietilenglicol		Mejora la capacidad de la fibra para la coloración, además disminuye la temperatura de fusión
	Bisfenol A		Perfecciona la rigidez de la fusión
	Grupo final EG		
	Grupo final DEG		
	Unidad de repetición bDEG		Mejora las propiedades mecánicas
	Grupo final Vinil		Funcionalización del grupo final del PET
<b>Diácidos</b>	Ácido Tereftalato		Los grupos finales carboxilo y acetaldehído, ocasiona que el polímero se torne amarillento además se da la reducción de la estabilidad hidrolítica y térmica
	Ácido Isoftálico		Resistencia a la temperatura de fusión.

	Ácido naftaleno-2,6-dicarboxílico		Óptimas propiedades mecánicas, reducción de la permeabilidad del gas
	Unidad repetida TPA		Mejor estabilidad hidrolítica y térmica

Fuente: Mandal,S.; Dey,A.2019, pp.4-5.

Realizado por: Sánchez, M.2021.

La densidad del PET cristalino es  $1.455 \text{ g/cm}^3$  y del PET amorfo es  $1.333 \text{ g/cm}^3$ . Para la síntesis del PET son necesarias cuatro etapas. Las dos reacciones necesarias para la formación de las grandes cadenas de PET son: la esterificación de carboxilos con grupos extremos hidroxilo y la transesterificación de glicol-esteres con terminación de hidroxilos. Las reacciones inversas son hidrólisis y glicólisis (Mandal y Dey, 2019, pp.5-6).

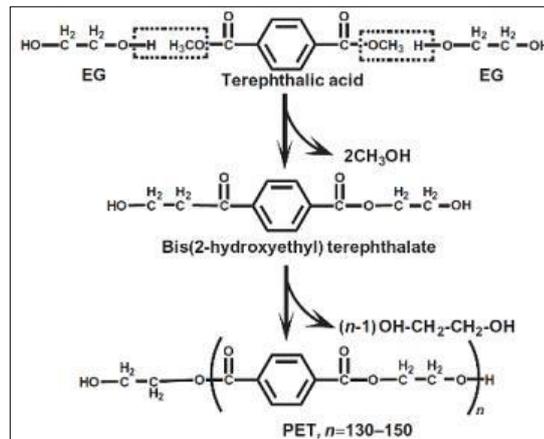


Figura 5-1. Síntesis de bis(2-hidroxietilo) tereftalato

Fuente: Mandal,S.; Dey,A. 2019, p.7.

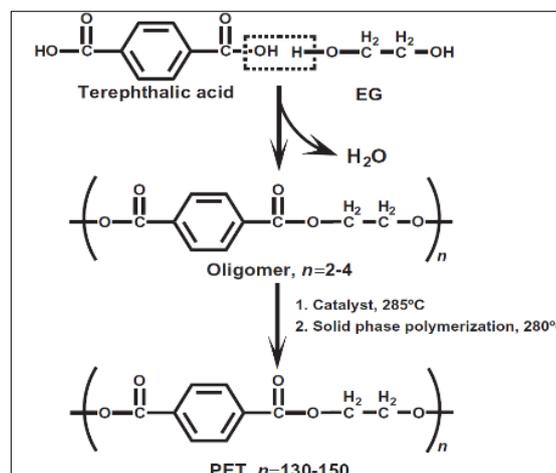
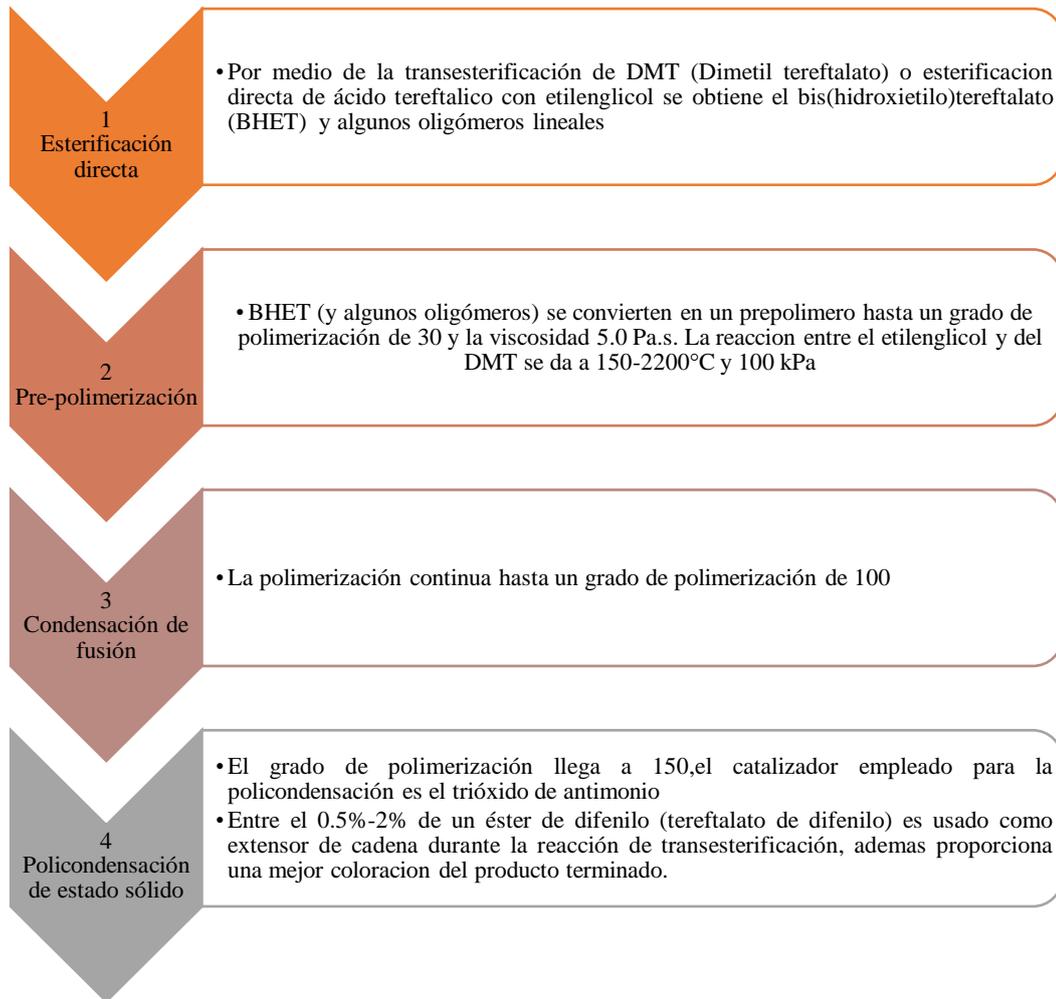


Figura 6-1. Síntesis del Tereftalato De Polietileno

Fuente: Mandal,S.; Dey,A. 2019, p.7.



**Figura 7-1.** Etapas para la síntesis del PET

Fuente: Mandal,S.; Dey,A. 2019, pp.6-8.

### 1.2.3. *Reciclaje*

El reciclaje es considerado como una forma de manejo de residuos, permitiendo modificar el ciclo de vida de los productos; limitando así, la necesidad de extraer y procesar nuevas materias primas. Existen dos métodos de recuperación del PET, el reciclaje y la incineración. Sin embargo, la incineración presenta desventajas como: la generación de gases tóxicos conjuntamente con la ceniza residual que posee el plomo y el cadmio. Por otro lado, el reciclaje disminuye la problemática ambiental con ello la preservación tanto de materiales como de energía (Chirayil, Mishra y Thomas, 2018, p.45).



**Figura 8-1.** Reciclaje de botellas PET

Fuente: Chirayil,C.;Mishra,R.;Thomas,S. 2018, p.43.

### 1.2.3.1. Reciclaje Primario

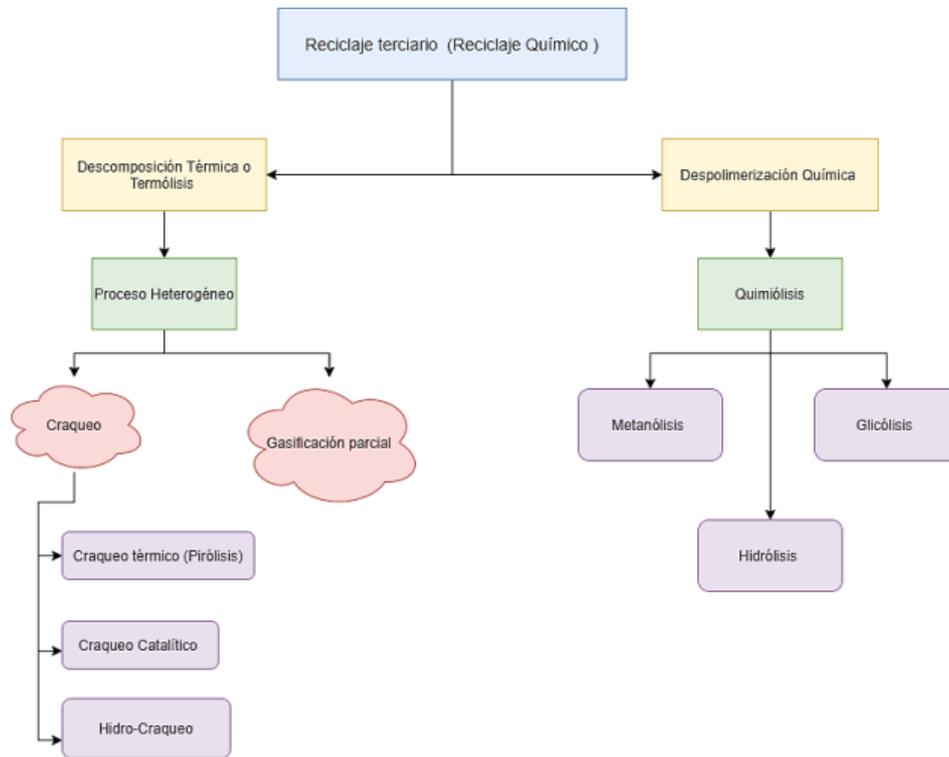
También conocido como reciclaje *in situ*, ciclo cerrado o re-procesamiento. En este tipo de reciclaje se da un re-introducción de residuos plásticos post- industrial con el objetivo de fabricar productos con un material similar. Por lo general, se aplican residuos industriales sin contaminar, además de que la recuperación se desarrolla mediante mezclas con resina virgen para obtener una menor pérdida de propiedades (Méndez, 2017, p.1).

### 1.2.3.2. Reciclaje Secundario

También es conocido como reciclaje mecánico. En este tipo de reciclaje solamente pueden participar los polímeros termoplásticos debido a que estos pueden ser refundidos, así como reprocesados. En este tipo de reciclaje no implica la modificación de las propiedades del polímero sino únicamente se da un cambio físico, el cual se forma cortando, triturando o limpiando en “pellets”. Posteriormente son fundidos para originar nuevos artículos conjuntamente con resinas vírgenes (Chirayil, Mishra y Thomas, 2018, p.46).

### 1.2.3.3. Reciclaje Terciario

También conocido como reciclaje químico o de materias primas, en este proceso se pretende degradar químicamente a los polímeros hasta obtener sus monómeros u oligómeros por medio de una reacción química. El tereftalato de polietileno es desintegrado por reactivos específicos, tales como: agua en el caso de hidrólisis, ácidos en la acidólisis, glicoles en la glucolisis y alcoholes en la alcoholólisis. El PET reciclado es usado como: fibras, películas, botellas, e/o (Chirayil, Mishra y Thomas, 2018, p.46).

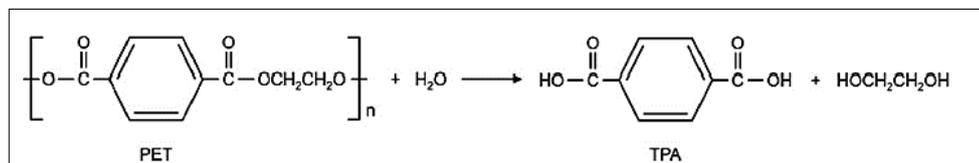


**Figura 9-1.** Reciclaje terciario

Fuente: Adrián., Méndez. 2020, p.1.

## Hidrólisis

La hidrólisis es uno de los métodos de reciclaje químico del PET en cual reacciona el tereftalato de polietileno con agua en tres tipos de ambiente: ácido, básico o neutro; con lo que se obtiene una despolimerización del plástico para obtener como monómeros el ácido tereftálico y etilenglicol. Con la hidrólisis de la cadena de PET se obtiene un grupo final carboxilo e hidroxilo (Han, 2019, p.91).

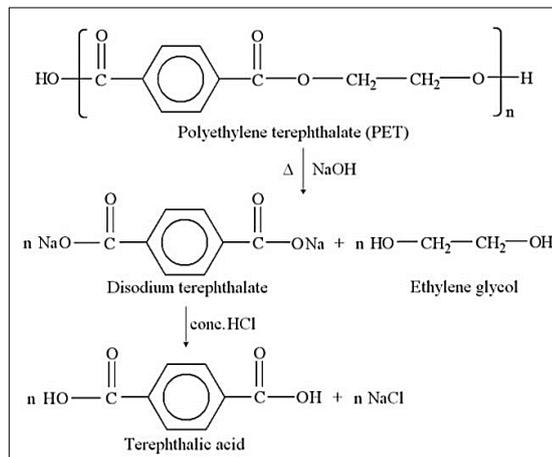


**Figura 10-1.** Hidrólisis del PET

Fuente: Myungwan., Han. 2019, p.86

## Hidrólisis Alcalina

Para la hidrólisis alcalina del PET se emplea hidróxido de sodio y potasio con una concentración de entre 4-20% m/m, los productos obtenidos de la reacción son etilenglicol y sal de tereftalato de disodio o dipotasio (TPA- $Na_2$  o TPA- $K_2$ ). Al neutralizar la mezcla con un ácido fuerte mineral se obtiene ácido tereftálico (Langer et al., 2020, p.130).



**Figura 11-1.** Hidrólisis alcalina del PET

Fuente: Căta et al., 2017, p.532.

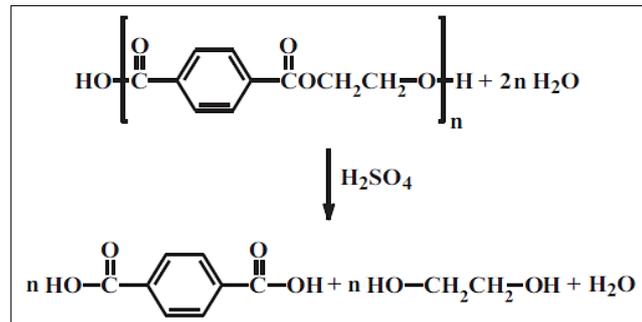
## Hidrólisis Neutra

Para la hidrólisis alcalina se emplea agua caliente o vapor. La ventaja que presenta la hidrólisis neutra sobre la hidrólisis ácida y alcalina es que, la neutra no presenta formación de sales inorgánicas. Las reacciones químicas que se presentan en la hidrólisis neutra no son corrosivas. Por lo tanto, se podría llegar a considerar mucho más amigable con el medio ambiente. Sin embargo, una de las desventajas que presenta es que, las impurezas presentes en el PET permanecen en el ácido tereftálico. El Etilenglicol obtenido es posible purificar por medio de la extracción o destilación (Langer et al., 2020, p.135).

## Hidrólisis Ácida

La hidrólisis ácida se desarrolla con el uso de ácidos y ácidos minerales (ácido fosfórico o nítrico), la desventaja que presenta la hidrólisis ácida del PET es la alta corrosividad de la mezcla de reacción, así como también las cantidades significativas de sales inorgánicas y agua contaminada. A una temperatura de 90°C, la despolimerización es casi completa con una concentración de ácido de más del 80%. La velocidad de reacción se desacelera con una concentración menor al 76%, adicionalmente a una temperatura de 60°C o menor la cantidad de pellets no reaccionantes

también crece. Uno de los inconvenientes de este tipo de hidrólisis es el costo que implica el proceso total (Han, 2019, p.91).

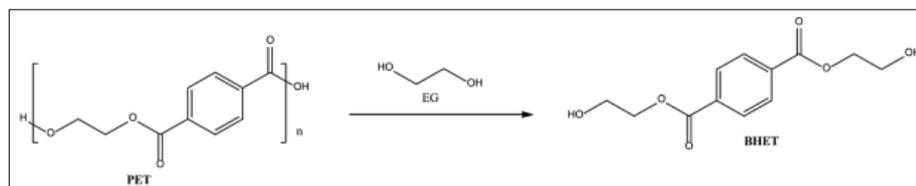


**Figura 12-1.** Hidrólisis acida del PET

Fuente: Langer et al., 2020, p.132.

### Glicólisis

La glicólisis tiene un mejor funcionamiento en comparación a la metanólisis durante una despolimerización heterogénea. La glicólisis del tereftalato de polietileno es uno de los reciclajes químicos más empleados para en el campo industrial. La glicólisis es el rompimiento de los enlaces éster del PET por un glicol, dando así la formación del bis (hidroxi-alquil) monómero del tereftalato conjuntamente con oligómeros con grupos hidroxilo terminales. Obligadamente se requiere de un catalizador para que la glicólisis pueda suceder. Mientras sucede la degradación del PET dos reacciones reversibles suscitan, la transformación del BHET a un dímero y la glicólisis del PET logrando un equilibrio conjuntamente de policondensación (Langer et al., 2020, p.136).



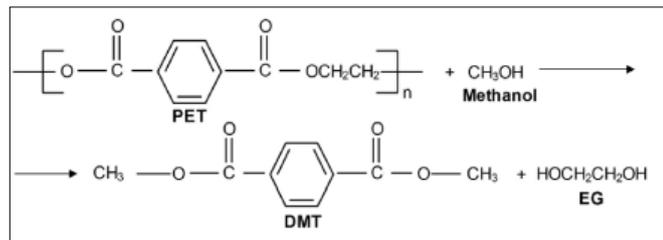
**Figura 13-1.** Glicólisis catalizado del PET-post consumo

Fuente: Zanela,T.; Muniz,E.; Almeida,C. 2018, p.228.

### Metanólisis

En la metanólisis se emplea metanol conjuntamente con altas temperaturas y presiones para poder degradar el PET, el principal derivado obtenido es el dimetil tereftalato (DMT) y etilenglicol. El rango de temperatura empleado es entre 180 y 280 °C y temperaturas de 2 y 4 MPa. El DMT obtenido de la metanólisis tiene propiedades similares al DMT virgen. El etilenglicol y metanol

pueden ser fácilmente recuperados. Uno de inconvenientes que presenta este método es el alto costo que implica la separación y refinación de la mezcla de productos de reacción (Al-Sabagh et al., 2016, p.6).

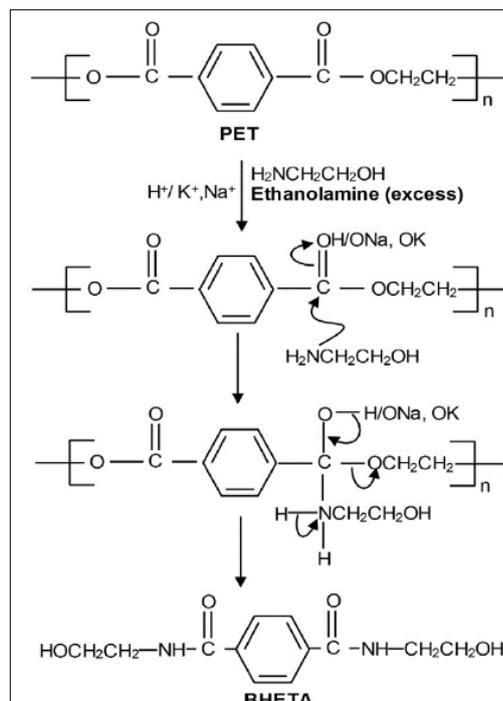


**Figura 14-1.** Metanólisis del PET

Fuente: Al-Sabagh et al., 2016, p.7.

### Aminólisis

Como descomposición del PET por medio de la aminólisis se obtiene como producto principal diamidas de TPA conocida como, bis (2-hidroxi etileno) tereftalamida (BHETA). A escala comercial no se ha registrado algún uso al derivado antes mencionado. Aunque, la aminólisis parcial se han empleado para mejorar las propiedades del tereftalato de polietileno en cuanto a la fabricación de fibras. La solución acuosa de metilamina, etilamina y etanolamina son empleados con mayor éxito para la aminólisis (Al-Sabagh et al., 2016, p.5).

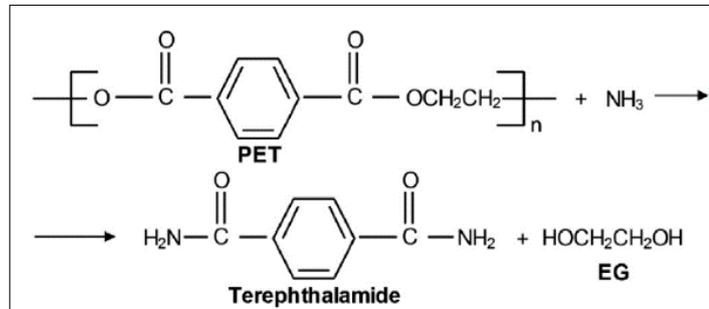


**Figura 15-1.** Aminólisis del PET

Fuente: Al-Sabagh et al., 2016, p.6.

## Amonólisis

El derivado obtenido de la amonólisis es la tereftalamida mediante la reacción química entre el amoníaco y el etilenglicol. Las condiciones empleadas para este proceso son de: una presión de 2MPa, temperatura de 120-180°C en un tiempo de 1 a 7 horas. Se filtra y se seca a una temperatura de 80°C. La pureza del producto obtenido, así como el rendimiento son de superiores al 99% y 90% respectivamente (Al-Sabagh et al., 2016, p.6).



**Figura 16-1.** Amonólisis del PET

Fuente: Al-Sabagh et al., 2016, p.6.

### 1.2.3.4. Reciclaje cuartanario

**Tabla 10-1:** Requerimientos para el procesamiento de láminas

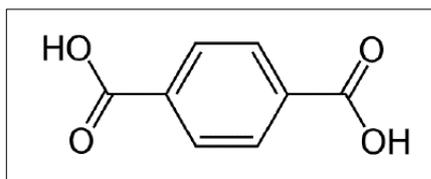
Propiedad	Valor
Coefficiente de viscosidad ( $\eta$ )	>0,7 dL/g
Punto de fusión $T_m$	>240°C
Contenido de agua	<0,02 wt.%
Tamaño de lamina	0,4 mm < D > 8mm
Contenido de tinte	<10 ppm
Contenido de metal	<3 ppm
Contenido de poliolefinas	<10 ppm

Fuente: Langer et al., 2020, p.129.

Realizado por: Sánchez, M.2021

El reciclaje cuaternario o también conocido como reciclaje de recuperación de energía o energía de los residuos. Este tipo de reciclaje hace referencia a la recuperación del contenido de energía del plástico. A pesar de que los materiales poliméricos son una gran fuente de energía, el reciclaje cuartanario es acusado de no ser tan “amigable con el ambiente”, debido a las sustancias toxicas que emite al aire, tal como las dioxinas (Langer et al., 2020, pp.162-163).

#### 1.2.4. Ácido tereftálico



**Figura 17-1.** Ácido Tereftálico

**Fuente:** Florencia, Combale., 2020, p.32.

Es el precursor de múltiples poliamidas y poliésteres, entre los más importantes se tiene al poliéster PET, el cual es empleado para fabricar recubrimientos y botellas de plástico. Otra aplicación importante es como Carrier en pinturas, además de materia prima para la síntesis de químicos como los fármacos (Almazán, 2019, p.8).

El ácido tereftálico ( $C_8H_6O_4$ ), también conocido como ácido 1,4-benzenodicarboxílico; ácido *p*-benedicarboxílico; ácido *p*-ftálico, es una sustancia sólida, polvo blanco, insoluble en agua. A nivel industrial, el ácido tereftálico se consigue desde la refinación del petróleo con el fraccionamiento del benceno hasta obtener *p*-xileno. Con la ayuda de catalizadores, se oxida el *para*-xileno hasta obtener ácido tereftálico crudo. También existen otros mecanismos de obtención que han sido desarrolladas para considerarlas como una opción más económica, entre las cuales se tiene: hidrólisis del dimetil-tereftalato y oxidación del tolueno (Almazán, 2019, p.8).

**Tabla 11-1:** Propiedades físicas del Ácido Tereftálico

Propiedad	Valor
Calor de sublimación	142 kJ/mol
Punto de sublimación	404 °C
Calor específico	1202 J/kg°K
Densidad	1510 g/L
Calor de combustión	3223 kJ/mol

**Fuente:** Florencia, Combale., 2020, p.34

**Realizado por:** Sánchez, M.2021.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO METODOLÓGICO

#### 2.1. Objetivos

##### 2.1.1. *Objetivo General*

- Determinar de la influencia del tamaño de partícula en la hidrólisis alcalina del polietilentereftalato (PET) post consumo

##### 2.1.2. *Objetivos Específicos*

- Recuperar ácido tereftálico mediante la despolimerización del polietilentereftalato post-consumo.
- Estimar el tamaño de pellet adecuado en la hidrólisis alcalina, mediante el cálculo del porcentaje de rendimiento de PET post- consumo degradado.
- Caracterizar las muestras obtenida mediante espectroscopia infrarroja y pruebas de solubilidad.

#### 2.2. Hipótesis y especificación de variables.

##### 2.2.1. *Hipótesis general*

Por medio de la hidrólisis alcalina, el tamaño de partícula podría llegar a influir en la despolimerización del Tereftalato de polietileno (PET)

##### 2.2.2. *Hipótesis específicas*

- Por medio de la hidrólisis alcalina del tereftalato de polietileno post- consumo se llegará a recuperar el Ácido tereftálico
- El mejor rendimiento de la despolimerización del PET post- consumo se obtendrá con el tamaño de partícula mínimo, 5mm
- Por medio de la caracterización de la muestra obtenida se establece la veracidad de la despolimerización del PET post-consumo, así como de sus propiedades.

### **2.2.3. Identificación de variables**

#### *2.2.3.1. Variables independientes*

- Tipo de plástico (PET post-consumo)
- Color del plástico PET post-consumo
- Tamaño de la partícula
- Masa de la muestra
- Temperatura de la hidrólisis alcalina
- Masa de NaOH
- Volumen etilenglicol y agua
- Tiempo de reacción
- Temperatura de secado

#### *2.2.3.2. Variables dependientes*

- pH
- % Despolimerización
- % Rendimiento del Ácido Tereftálico

#### 2.2.4. Operacionalización de variables

**Tabla 1-2:** Operacionalización de las variables que intervienen en el proceso de hidrólisis alcalina

Variable	Tipo de variable	Definición operacional	Categorización	Indicadores	Instrumento de medición	Valor
<b>Tipo de plástico</b>	Independiente, multidimensional, continua.	Es la clasificación de un material acorde a su naturaleza, estructura, composición, propiedades químicas y físicas.	-	Densidad	Materiales y reactivos de laboratorio	1,38 $g/cm^3$
				Test clásico de identificación	Materiales y reactivos de laboratorio	-
				Composición química	Espectrofotómetro infrarrojo	-
<b>Masa de muestra</b>	Independiente, unidimensional, continua	Muestra necesaria de la materia prima la cual representa la magnitud de una propiedad medible.	-	-	Balanza analítica	250 g
<b>Coloración</b>	Independiente, unidimensional, continua	La coloración se presenta al añadir un aditivo a la composición química del tereftalato de polietileno	-	Visual	-	-
<b>Tamaño de partícula</b>	Independiente, unidimensional, continua	Se define como la dimensión física de cualquier objeto o partícula.		Diámetro De Partícula	Calibrador	5-10 mm
			Hidrólisis alcalina	Calor	Termómetro	120°C

<b>Temperatura del proceso</b>	Independiente, unidimensional, continua	Magnitud física que determina la cantidad de calor o energía térmica de un sistema.	Temperatura de enfriamiento			Temperatura ambiente
<b>Masa NaOH</b>	Independiente, unidimensional, continua	Porción significativa de materia la cual representa un valor medible		-	Balanza digital	5g
<b>Tiempo de reacción</b>	Independiente, unidimensional, continua	Magnitud que mide la duración de eventos en el espacio.		-	Cronómetro	30 min
<b>Volumen agua, etilenglicol</b>	Independiente, unidimensional, continua	Magnitud escalar que determina el espacio que ocupa un cuerpo.	Agua		Probeta volumétrica	270mL
			Etilenglicol			20mL
<b>pH</b>	Dependiente, unidimensional, continua	Medida de acides o alcalinidad de una sustancia		Concentración de iones hidroxilo	pH-metro	2
<b>Temperatura y tiempo de secado</b>	Independiente, unidimensional, continua	La temperatura es una magnitud física que determina la cantidad de calor o energía térmica de un sistema. El tiempo es una magnitud que mide la duración de eventos en el espacio.	Temperatura		Estufa	60°C
			Tiempo			48 horas
<b>Rendimiento</b>			Despolimerización	-	Balanza analítica	%

	Dependiente, unidimensional, continua	Se define como la cantidad de producto obtenido en una reacción química y su cálculo es la relación entre el producto obtenido y la muestra de ingreso, multiplicado por 100.	Rendimiento “Ácido tereftálico”			
<b>Volumen de reactivos (pruebas de solubilidad)</b>	Independiente, unidimensional, continua	Magnitud escalar que determina el espacio que ocupa un cuerpo.	-	-	Pipeta	2 mL

Realizado por: Sánchez, M.2021.

### 2.2.5. Matriz de consistencia

**Tabla 2-2:** Matriz de consistencia

ASPECTOS GENERALES				
Problema general		Objetivo general		Hipótesis general
La contaminación ambiental que provoca los desechos de plásticos ha causado que el mundo tenga que buscar alternativas para el reciclaje del plástico. Una botella de PET puede llegar a degradarse hasta en 1000 años.		Determinar de la influencia del tamaño de partícula en la hidrólisis alcalina del polietilentereftalato (PET) post consumo		Por medio de la hidrólisis alcalina, el tamaño de partícula podría llegar a influir en la despolimerización del Tereftalato de polietileno (PET)
ASPECTOS ESPECÍFICOS				
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Variables de las hipótesis específicas	Técnicas de recolección de datos
Falta de implementación de nuevas técnicas de reciclaje del plástico	Recuperar ácido tereftálico mediante la despolimerización del tereftalato de polietileno post-consumo.	<b>H1:</b> Por medio de la hidrólisis alcalina del tereftalato de polietileno post- consumo se llegará a recuperar el Ácido tereftálico	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Tipo de plástico (PET post-consumo)</li> <li>✓ Coloración del PET post-consumo</li> <li>✓ Tamaño del pellet del PET post-consumo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Densidad</li> <li>✓ Numeración (1)</li> <li>✓ Test clásico de identificación</li> <li>✓ Espectrofotómetro IR</li> </ul>

Desconocimiento del tamaño adecuado de pellet para el mejor aprovechamiento del residuo.	Estimar el tamaño de pellet adecuado en la hidrólisis alcalina, mediante el cálculo del porcentaje de rendimiento de PET post- consumo degradado.	<b>H2:</b> El mejor rendimiento de la despolimerización del PET post-consumo se obtendrá con el tamaño de partícula mínimo, 5mm.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Temperatura</li> <li>✓ Concentración de NaOH</li> <li>✓ Volumen agua y etilenglicol</li> <li>✓ Tiempo de reacción</li> <li>✓ pH</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Hidrólisis alcalina del plástico de dos colores diferentes y tamaño de partícula entre 5-10mm</li> <li>✓ Cálculo del % de rendimiento y % de despolimerización</li> </ul>
Las características que puede llegar a presentar el ácido tereftálico puede o no tener la capacidad de asimilarse al ácido tereftálico de venta en el mercado.	Caracterizar las muestras obtenida mediante espectroscopia infrarroja IR, y pruebas de solubilidad	<b>H3:</b> Por medio de la caracterización de la muestra obtenida se establece la veracidad de la despolimerización del PET post-consumo, así como las propiedades y características que presenta el ácido tereftálico	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Masa a caracterizar</li> <li>✓ Volumen de reactivos para pruebas de solubilidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Pruebas de espectroscopía IR.</li> <li>✓ Pruebas de caracterización del <math>C_8H_6O_4</math></li> </ul>

Realizado por: Sánchez, M.2021.

## **2.3. Tipo y diseño de investigación**

### **2.3.1. Tipo de investigación**

El presente trabajo “Determinación De La Influencia Del Tamaño De Partícula En La Hidrólisis Alcalina Del Polietilentereftalato (Pet) Post Consumo” es de tipo exploratoria, el cual está enfocado en el desarrollo, análisis e interpretación de resultados y aspectos importantes, obteniendo como consecuencia del mismo, la despolimerización del PET en ácido tereftálico.

### **2.3.2. Método deductivo**

Con el método deductivo, se busca implementar una alternativa para el tratamiento del plástico mediante la hidrólisis alcalina del PET. Los enlaces que permite unir a las moléculas, se rompen con la hidrólisis. Además de ello, se logrará identificar el tamaño del pellet adecuado para dispersar la duda sobre la veracidad o falsedad de la premisa propuesta.

### **2.3.3. Método inductivo**

Mediante el método inductivo, se pretende considerar todas las hipótesis, razonamientos, trabajos anteriormente realizados y conclusiones que hayan sido realizados por otros autores. Entre los trabajos tomados como referencia para el desarrollo de la presente investigación, se debe considerar que fueron seleccionados artículos de los últimos 4 años.

### **2.3.4. Diseño experimental de la investigación**

Para el diseño experimental de “Determinación De La Influencia Del Tamaño De Partícula En La Hidrólisis Alcalina Del Polietilentereftalato (PET) Post Consumo” se ha dividido todo el proceso en 3 etapas, las cuales son detalladas a continuación:

#### **2.3.4.1. Etapa uno**

Se realizó para caracterizar a la materia prima (PET post-consumo), para la cual se deben realizar: identificación de la numeración acorde a la tabla 1-1, Test clásico e identificación química del PET mediante el espectrofotómetro infrarrojo.

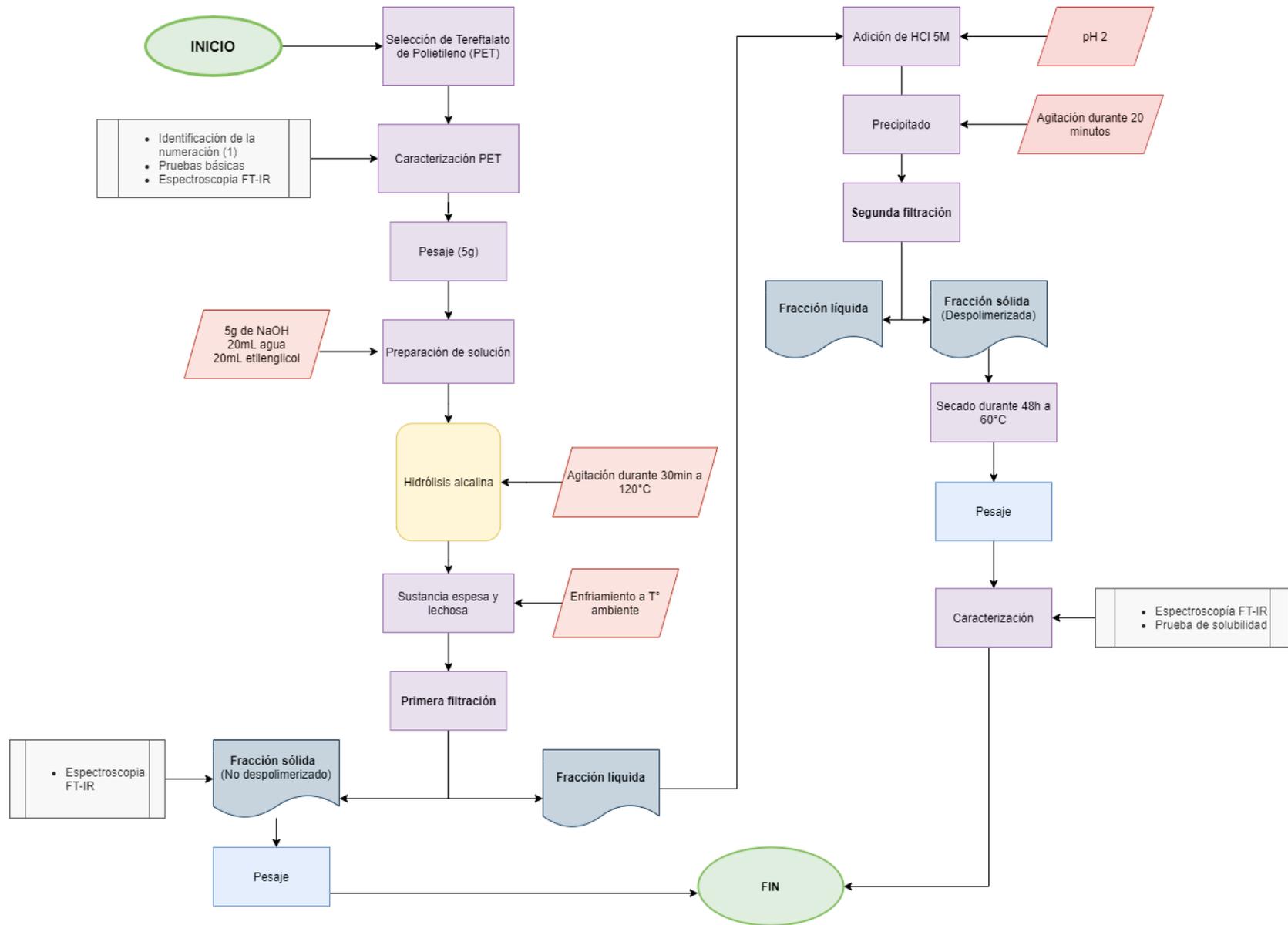
#### *2.3.4.2. Etapa dos*

En la segunda etapa se da inicio al desarrollo la hidrólisis alcalina con dos tamaños de pellet (5-10mm), al igual que dos colores de plástico, verde y rosado. El tiempo de reacción empleado para la hidrólisis es de 30 minutos y una temperatura de 120 °C.

#### *2.3.4.3. Etapa tres*

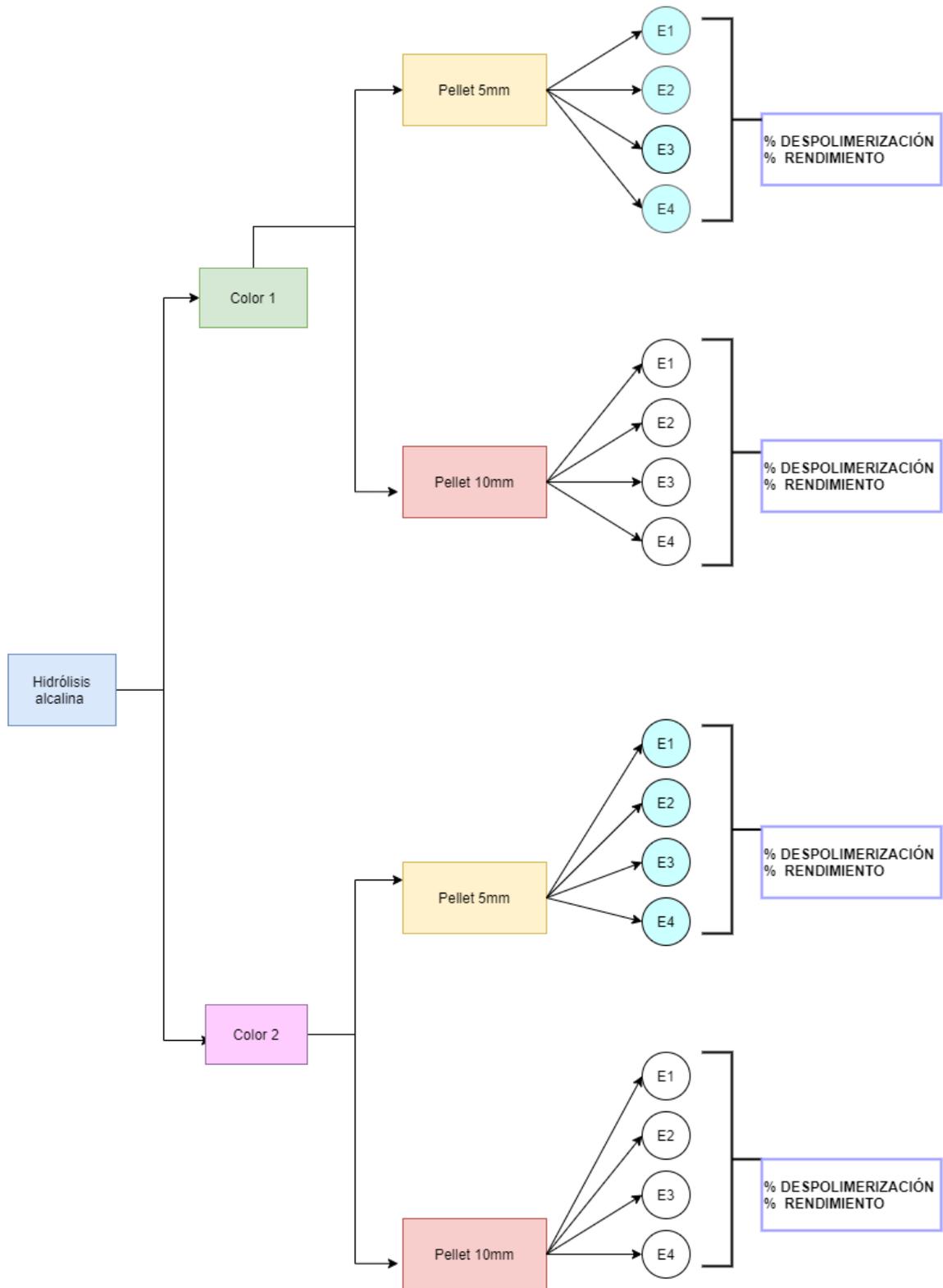
La última etapa es de caracterización y análisis del producto obtenido de la despolimerización del plástico para lo cual se emplea el espectrofotómetro IR y la prueba de solubilidad del monómero resultante de la hidrólisis alcalina.

El diagrama presentado a continuación representa el esquema general del proceso.



**Figura 1-2. Hidrólisis alcalina**

Fuente: Sánchez, M.2021.



**Figura 2-2.** Diseño Experimental  
 Fuente: Sánchez, M.2021.

## **2.4. Unidades de análisis**

La unidad de análisis en la cual se centrará el presente trabajo es el tereftalato de polietileno post-consumo, más conocido como PET cuya numeración es (1), el plástico a emplear fue reciclado dentro de las instalaciones de la ESPOCH y no fue sometido a ningún tratamiento previo, a excepción de la limpieza, secado del plástico y las pruebas para corroborar la veracidad del tipo de plástico a emplear.

## **2.5. Población de Estudio**

La población de estudio es al azar. Para la recolección del plástico tipo PET dentro de las instalaciones de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, se han recolectado diariamente durante tres semanas una botella diferente, teniendo prioridad sobre aquellas botellas con aditivos colorantes. Es importante tener en consideración que, actualmente la Politécnica no se encuentra laborando con normalidad es por ello que, se ha empleado la técnica de recolección mencionada.

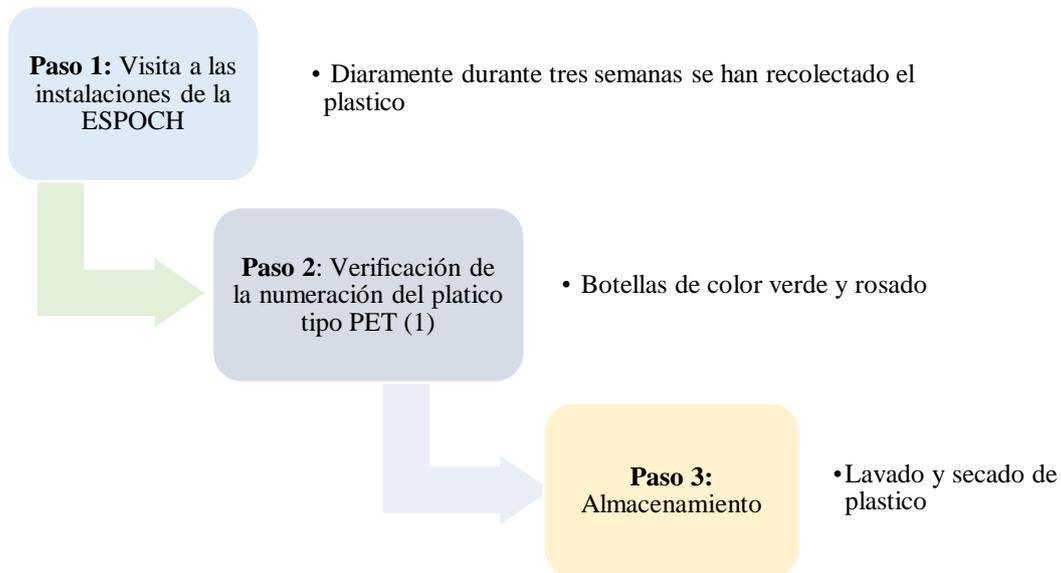
## **2.6. Tamaño de Muestra**

Para la realización de la experimentación sobre la hidrólisis alcalina del PET, se empleará 5,0g de plástico por cada ensayo y por cada combinación de prueba (tamaño de partícula y coloración de plástico) se realizará 4 repeticiones; por lo que en total se obtendrá un valor de 16 ensayos, siendo consecuentemente 100gr de plástico que serán empleados.

## **2.7. Selección de muestra**

Para la selección de la muestra se ha tomado en considerando los criterios de la investigación a realizar en el presente trabajo. Se han elegido como muestra, plástico tipo PET (1) de dos colores, verde y rosado.

El siguiente diagrama representa el proceso desarrollado para la selección de la muestra.



**Figura 3-2.** Selección de muestra

Realizado por: Sánchez, M.2021.

## 2.8. Técnicas de recolección de datos

El desarrollo de la parte experimental del presente trabajo en su totalidad, es decir, tanto la primera, segunda y tercera etapa fueron realizados en dos laboratorios de la ESPOCH:

- Laboratorio de Química Analítica
- Laboratorio de Química Instrumental

La totalidad de la parte experimental se realizó en el laboratorio de Química Analítica. Para las pruebas realizadas en el espectrofotómetro infrarrojo se empleó el laboratorio de Química Instrumental.

### 2.8.1. Caracterización del plástico PET

El plástico seleccionado para realización de la investigación es del tipo PET. De igual manera, el color seleccionado del mismo fue verde y rosado, preferentemente de botellas de bebidas gaseosas de marca Big Cola (plástico verde) e Imperial (plástico rosado). El plástico fue recortado a las dimensiones de 5mm y 10mm con ayuda de un bisturí y un calibrador.



**Figura 4-2.** Plástico PET

**Realizado por:** Sánchez, M.2021.

Para la caracterización del plástico PET, el análisis preliminar fue la verificación de la numeración del plástico acorde a la Tabla 1-1.



**Figura 5-2.** Numeración del plástico

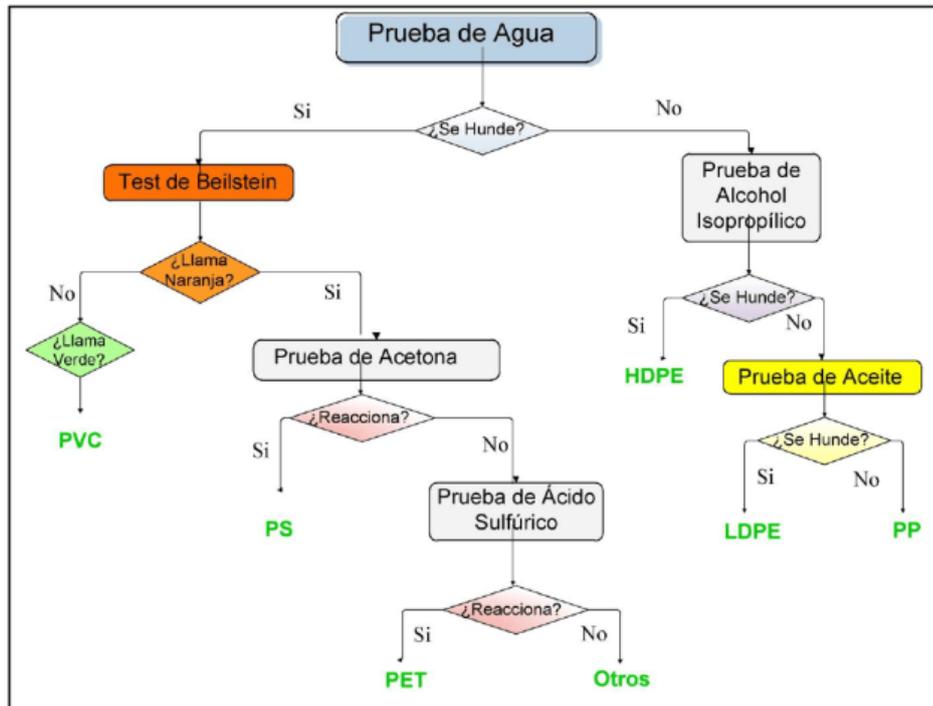
**Realizado por:** Sánchez, M.2021.

Además de ello, para confirmar que efectivamente el plástico seleccionado es PET, se aplicaron los análisis detallados a continuación:

#### *2.8.1.1. Test clásico de identificación de plásticos*

*Por lo general, los plásticos poseen un valor de densidad tomando como referencia, el cual puede variar debido a varios factores, tales como: la cristalinidad, pérdida de plastificante o absorción de disolvente. A lo largo de la muestra, ciertas porciones también pueden diferir en cuanto a su densidad debido a la diferencia de cristalinidad, porosidad, cambios de composición del material, aditivos o pigmentos (Impact Plastics, 2018, párr.5).*

El test de Beilstein es un ensayo empleado para determinar la presencia de halógenos en el material. La reacción se presenta cuando el halógeno está en contacto con compuestos de cobre y al ser sometido a altas temperaturas se producen átomos o iones de cobre excitados, presentándose así una llama de color verde brillante (Macas, 2017, p.6).



**Figura 6-2.** Caracterización de polímeros.

Fuente: María.,Suasnavas, 2016, p.23.

**Tabla 3-2:** Densidad de algunos plásticos

Tipo de plástico	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
Tereftalato de polietileno (PET)	1350-1390
Polietileno de alta densidad (HDPE)	930-970
Polietileno de baja densidad (LDPE)	917-925
Policloruro de vinilo (PVC)	1100-1450
Furanoato de Polietileno (PEF)	1400-1550
Polipropileno (PP)	904 - 906

Fuente: Alaerts, L.; Augustinus, M.; Van Acker, K. 2018, p.4.

Realizado por: Sánchez, M.2021.

Para determinar la densidad de muestras plásticas se coloca el plástico en un tubo de ensayo en agua, además de agregar isopropanol (en caso de que la densidad de la muestra sea mayor a 1 kg/m<sup>3</sup>, se emplea otro reactivo, la prueba termina cuando el plástico alcanza una flotabilidad neutra (Smithers, 2021, párr.1).

En la figura 23-2. Se puede evidenciar la secuencia a seguir para identificar el PET.

## **Materiales**

- Varilla de agitación
- 4 tubos de ensayo
- Gradilla
- Cable de cobre de 10 cm
- Lámpara de alcohol
- Espátula
- Tapones
- Caja de fósforos

## **Reactivos**

- Plástico PET
- Alcohol industrial
- Agua destilada
- Acetona
- Ácido Sulfúrico

## **Procedimiento**

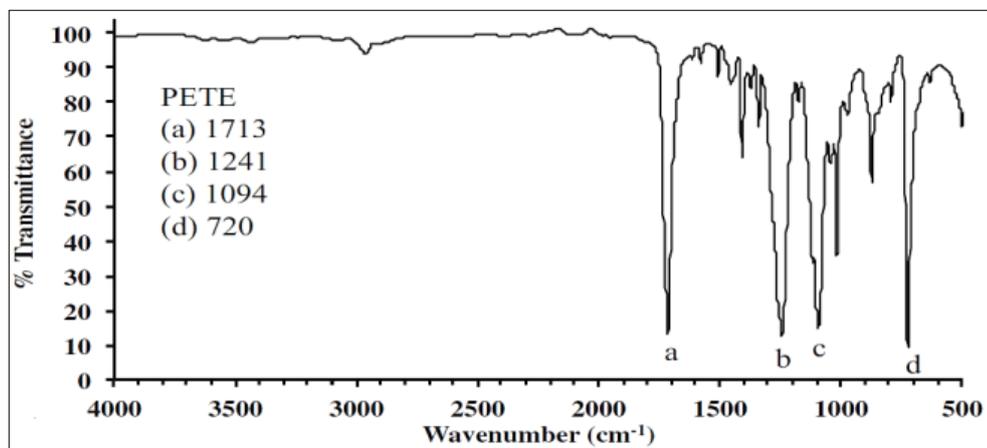
- Limpiar los tubos de ensayo y la varilla de agitación
- Seleccionar las muestras, plástico de 10 mm (verde y rosado).
- Ingresar 2 mL de agua destilada en el tubo de ensayo, conjuntamente con el plástico
- Con la ayuda de la varilla de agitación, sumergir completamente la muestra para evitar la formación de burbujas de aire
- Registrar el fenómeno presentado. ¿Flota o no Flota?
- Para la el test de Beilstein, colocar un poco de alcohol industrial en la lámpara de alcohol, verificar que este bien cerrada y encender la llama
- Sujetar uno de los extremos del cable de cobre con un corcho para evitar quemaduras producidas por la transmisión de calor.
- Calentar el plástico en la lámpara de alcohol hasta derretir una ínfima muestra de plástico.
- Una vez adherido el cable caliente sobre el plástico, llevar nuevamente todo el sistema a la llama para verificar algún cambio de color.
- Evidencia y registrar el fenómeno presenciado.

- Se agrega 2 mL de acetona en un tubo de ensayo y conjuntamente con los trozos de plástico. Registrar los resultados.
- Se agrega 5mL de  $H_2SO_4$  concentrado al 96% en tubo de ensayo luego se procede a introducir el plástico, se calienta el sistema a baño maría durante 30 minutos. Se deja reposar y enfriar la muestra. Registrar los resultados

### 2.8.1.2. Espectroscopía infrarroja

Es un tipo de espectroscopia vibracional que se encarga de medir la absorción de la radiación infrarroja y da como resultado información sobre los grupos funcionales de la muestra analizada. Como consecuencia del movimiento vibratorio, las moléculas sufren un cambio en el momento dipolar ocasionando así, que la radiación infrarroja sea absorbida por la muestra. Un espectro IR tiene como coordenadas en el eje de las abscisas el número de onda ( $cm^{-1}$ ) y en las ordenadas la transmitancia (Unidad de Materiales, 2019, párr.3).

Las diferentes maneras de vibración tanto de la frecuencia como de la intensidad provocan que la espectroscopia infrarroja sea sensible a la estructura química y física. Es por ello que este tipo de análisis es aplicable para la identificación de homopolímeros, tales como: Tereftalato de polietileno (PET), polipropileno (PP), policloruro de vinilo (PVC), poliestireno (PS), e/o. Además, se puede emplear para identificar cuantitativamente copolímeros y su secuencia, mezclas poliméricas, determinación cinética de polimerización, identificación de monómeros residuales y aditivos (Unidad de Materiales, 2019, párr.7).



**Figura 7-2.** Espectro IR del Tereftalato de Polietileno

Fuente: Jung et al., 2018, p.707.

En la figura anterior se presentan los cuatro picos característicos del tereftalato de polietileno. En el pico (a) se tiene una banda de absorción de  $1713cm^{-1}$  el cual corresponde al estiramiento de C=O del grupo ácido carboxílico, para el pico (b) y (c) se tiene  $1241cm^{-1}$  y  $1094cm^{-1}$

respectivamente, los cuales indican el estiramiento de C-O. Por último, para el pico (d) a  $720\text{ cm}^{-1}$  se tiene CH aromático (Jung et al., 2018, p.707).

### **Materiales**

- Espátula
- Algodón
- Brocha

### **Reactivos**

- Muestra de plástico PET
- Alcohol

### **Equipos**

- Espectrofotómetro infrarrojo JASCO FT/IR 4100

### **Procedimiento**

- Prender el equipo en el “switch Power” e iniciar el barrido (ejecutar “Spectra Manager” )
- Limpiar con un poco de algodón, una brocha y alcohol el área de muestra.
- Cerrar la tapa del espectrofotómetro y presionar el botón “Start”
- Ejecutar un barrido espectral, para lo cual se coloca la muestra sobre el cristal del área de muestra, se quita el seguro y se tira hacia adelante el tornillo de ajuste, se debe verificar que el tornillo este cerrado completamente y se cierra la tapa. Se hace click en “Start”.
- Corregir las escalas de dióxido de carbono.
- Identificar aquellos los picos más relevantes. Señalar líneas auxiliares.
- Proceder a guardar el espectro obtenido como un archivo del programa empleado, así como en Microsoft Word.
- De ser necesario, repetir el procedimiento.
- Cerrar todos los programas; se debe desconectar y apagar el ordenador de ambos switches

### 2.8.2. *Hidrólisis alcalina del PET*

Una vez identificado el tipo de plástico seleccionado para la realización del trabajo de investigación, se procede con el reciclaje químico del plástico tipo PET. Se emplearon dos variables, la primera es el tamaño de partícula el cual fue de entre 5mm y 10mm, la segunda es el color de plástico, verde y rosado. En cada prueba se realizaron cinco ensayos con sus respectivos rendimientos, tal como se muestra en la figura 19-2.

#### **Materiales**

- Vaso de precipitación de 250mL
- Vaso de precipitación de 600mL
- Varilla de agitación
- Kitasato de 500mL
- Embudo Buchner
- Probeta de 25mL
- Probeta de 100mL
- Espátula
- Mortero con pistilo
- Papel filtro
- Imán del agitador magnético
- Tapa de acero
- Mangueras
- Pipeta de 10 mL
- Pera de succión
- Balón de aforo de 250 mL
- Corcho
- Cajas Petri

#### **Reactivos**

- Hidróxido de sodio
- Plástico PET post-consumo
- Etilenglicol
- Agua destilada
- HCl 5M

## Equipos

- Balanza analítica OHAUS EXPLORER, EX 224
- Agitador magnético con plancha de calentamiento THERMO FISHER SCIENTIFIC
- Estufa POL-EKO, SRN 115
- Bomba al vacío GM-0.5
- pH-metro OAKLON 2700

## Procedimiento

Cada ensayo siguió el mismo tratamiento, las únicas variables que se presentaron entre ellos fue el color y tamaño de partícula.

- **Preparación de la muestra**

Pesar 5 g de cada muestra de pellet y 5 g de NaOH con la ayuda de la balanza analítica, las cuales posteriormente deben ser colocadas en un vaso de precipitación de 250mL conjuntamente con 20mL de etilenglicol y 20mL de agua destilada



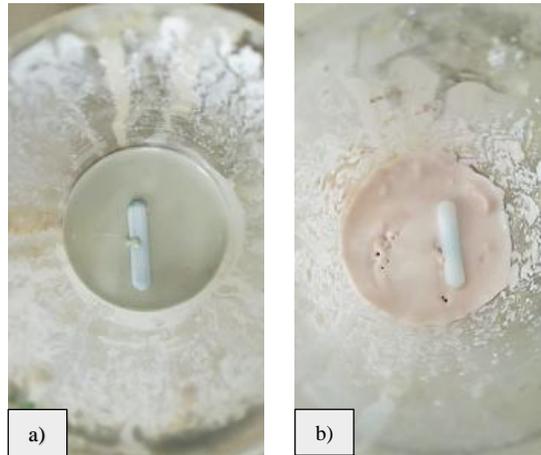
**Figura 8-2.** Preparación de la muestra

Fuente: Sánchez, M.2021.

- **Hidrólisis alcalina**

Una vez preparada la muestra se coloca el imán magnético en el vaso de precipitación y se calienta la muestra a 120°C por un tiempo aproximado de 30 minutos. Alrededor de 20 minutos se evidencia la formación de una sustancia espesa, la cual indica que el plástico ha iniciado la

despolimerización. Al terminar la media hora, la muestra obtenida presenta una coloración azulada verdosa (plástico verde) y melón (plástico rosado) y se deja enfriar a temperatura ambiente. Para finalizar se adiciona 250mL de agua destilada y se agita.



**Figura 9-2.** Despolimerización del PET  
a) plástico verde, b) plástico rosado

Fuente: Sánchez, M.2021.

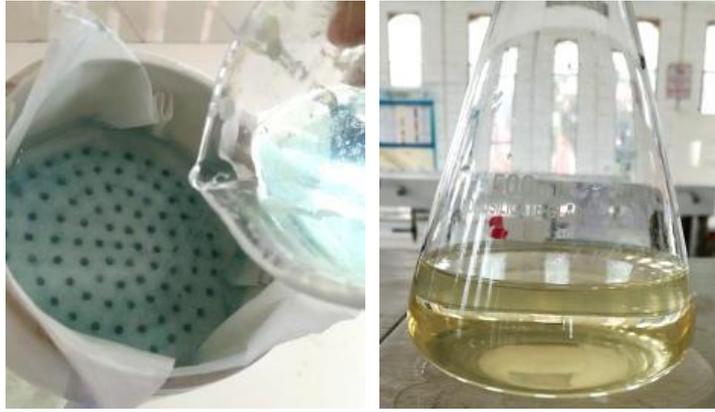


**Figura 10-2.** Adición de agua destilada

Fuente: Sánchez, M.2021.

- **Primera filtración**

Para la primera filtración es necesario que la muestra este completamente fría. Con ayuda del Kitasato, el embudo Buchner, papel filtro y la bomba a vacío se añade gota a gota la sustancia a filtrar. En la primera filtración se tiene una fase sólida y una fase líquida, esta última es de interés para la realización del presente trabajo.



**Figura 11-2.** Primera filtración

Fuente: Sánchez, M.2021.

- **Neutralización**

Someter a un cambio de pH de básico a ácido. Exactamente con un pH 2, para lo cual se emplea ácido clorhídrico 5M, se obtiene un precipitado blanquecino. Agitar la muestra obtenida durante 20 minutos.



**Figura 12-2.** Precipitado

Fuente: Sánchez, M.2021.

- **Segunda filtración, secado, pesaje y molienda**

Para la segunda filtración, la fracción sólida es de interés. El producto sólido obtenido debe ser secado en la estufa por 48 horas a 60°C. Pasado el tiempo requerido, se retira la muestra y finalmente se obtiene un polvo blanco. Pesar y moler en el mortero el producto obtenido.

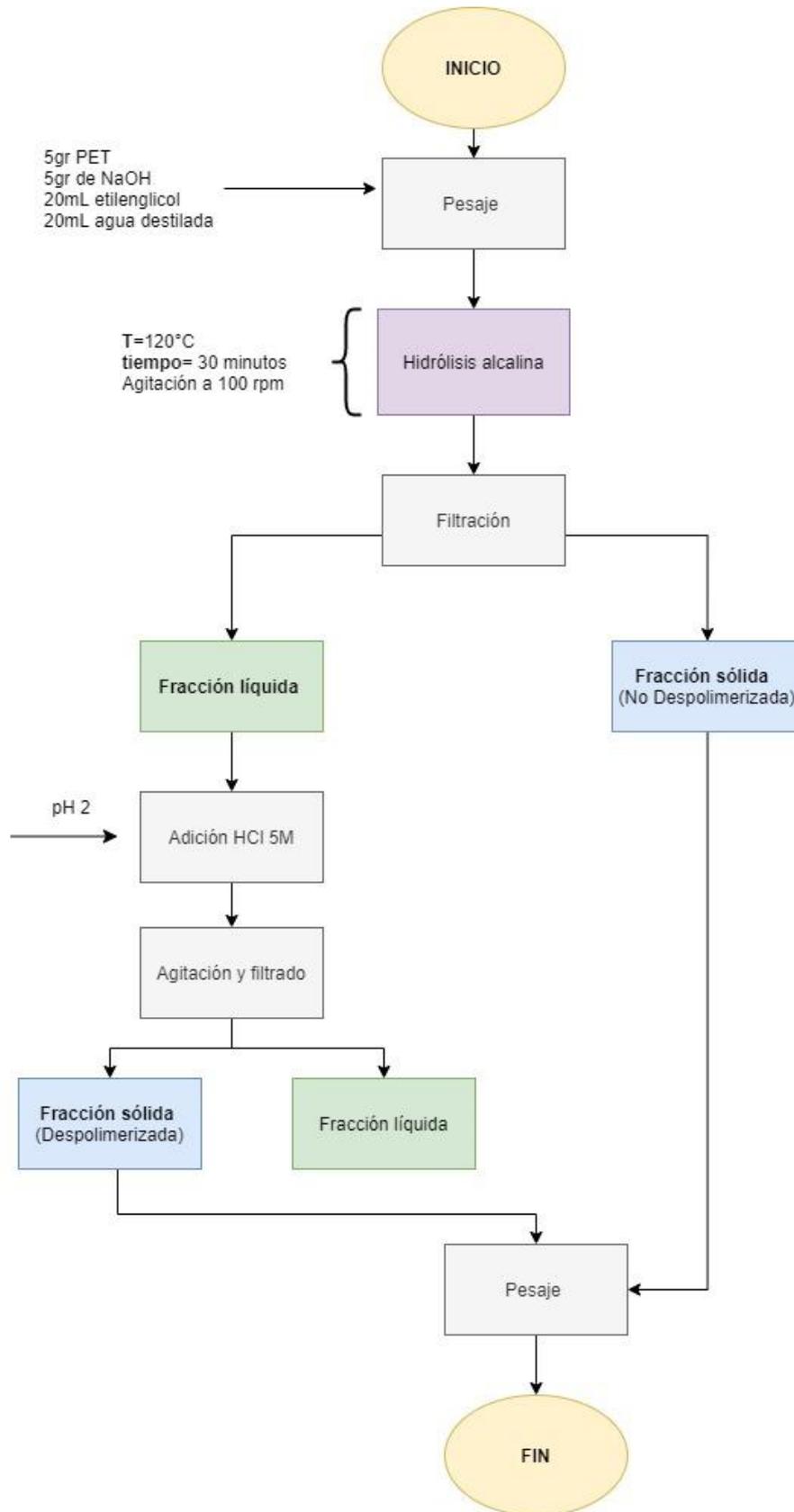


**Figura 13-2.** Fracción sólida despolimerizada

Fuente: Sánchez, M.2021.

- **Almacenamiento**

El producto es almacenado en cajas Petri para su posterior análisis.



**Figura 14-2.** Procedimiento para la obtención de Ácido Tereftálico

Fuente: Sánchez, M.2021.

### 2.8.2.1. Rendimiento de la fracción sólida

Para determinar el porcentaje de despolimerización obtenido en el proceso son necesarios dos datos los cuales son:  $M^0_{PET}$ , masa inicial del PET ingresado en el sistema y  $M^1_{PET}$ , masa de PET que NO ha reaccionado. En la Ecuación 1-2 se encuentra la fórmula a emplear.

*Ecuación 1-2: Porcentaje de despolimerización*

$$\%Dp = \frac{M^0_{PET} - M^1_{PET}}{M^0_{PET}} \times 100$$

Para el cálculo del rendimiento se empleó la Ecuación 2-2, peso teórico del ácido tereftálico y peso real del ácido tereftálico. La fórmula es detalla a continuación:

*Ecuación 2-2: Porcentaje de Rendimiento*

$$\%R = \frac{M^{exp}_{TPA}}{M^{teórico}_{TPA}} \times 100$$

**Donde:**

$\%R$ = porcentaje de rendimiento

$M^{exp}_{TPA}$ = Masa final de la fracción sólida (experimental) (g)

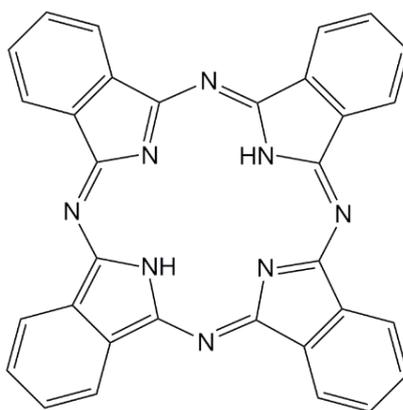
$M^{teórico}_{TPA}$ = Masa final de la fracción sólida (teórico) (g)

De acuerdo al estudio realizado por (Căta et al., 2017), con 1 g de PET se obtiene como fracción sólida teórica 0,8645g de TPA. Es por tanto que, de acuerdo a la estequiometría de la reacción de la hidrólisis alcalina del tereftalato de polietileno con 5g de PET se obtiene una fracción teórica de 4,3225g. Es importante aclarar que, se considera como fracción sólida másica teórica de TPA aquella que se obtiene de la despolimerización completa del plástico.

### 2.8.3. Análisis físico-químico de la fracción sólida NO Despolimerizada

#### 2.8.3.1. Espectroscopía Infrarroja FT-IR

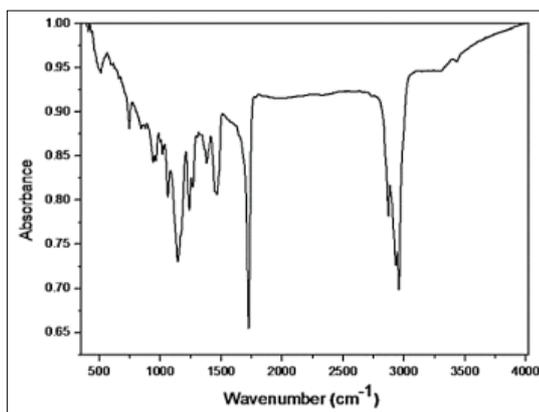
La fracción sólida NO despolimerizada representa el pigmento del plástico, así como los residuos del PET que no han reaccionado. Para determinar la presencia del grupo funcional perteneciente y característicos de cada pigmento se ha empleado la espectroscopía FT-IR. Los pasos empleados en el literal 2.8.1.2 son similares a los que se ha empleado para el presente análisis.



**Figura 15-2.** Ftalocianina

Fuente: Sociedad Química Estadounidense, 2014.

Mediante la espectroscopia por transformada de Fourier, se ha encontrado las bandas 750,950 y 1063  $cm^{-1}$  cuyos valores representan picos característicos de la ftalocianina esquelética, evidenciando así la presencia del pigmento en estudio. En 1724  $cm^{-1}$  se tiene estiramiento de N-H. A los picos de 1145 y 1234  $cm^{-1}$  se tiene el tramo C-N y a 2860  $cm^{-1}$  se tiene el estiramiento C-H correspondiente a  $CH_3$  (Zina et al., 2018, p.5).

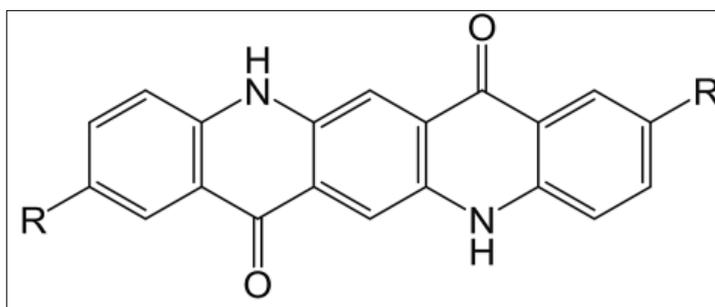


**Figura 16-2.** Ftalocianina

Fuente: Zina et al., 2018, p.5.

La quinacridona es un pigmento de naturaleza heterocíclico, la estructura típica es un sistema policíclico de cinco anillos, los tres anillos corresponden al benceno y los otros dos anillos a la piridona que funciona como puente entre los anillos de benceno. Los cinco anillos pueden tener una forma lineal o angular, y en anillo de piridina pueden estar en posición cis o trans. El pigmento

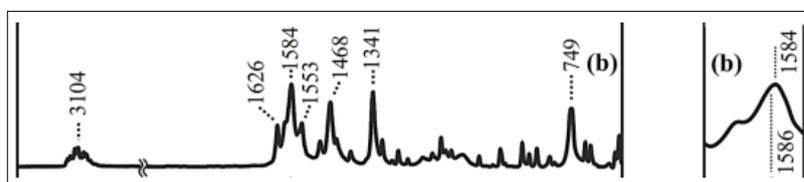
ineal y trans de quinacridona es de gran interés en la industria para la coloración de los plásticos (Christie, 2015, pp.113-116).



**Figura 17-2.** Quinacridona

Fuente: Dunst et al., 2017, p.866.

“Las bandas que surgen de la quinacridona son:  $3104\text{ cm}^{-1}$  ( $\nu\text{ NH}$ ),  $1626\text{ cm}^{-1}$  ( $\nu\text{ C=O}$ ),  $1584\text{ cm}^{-1}$  ( $\nu\text{ C=C}$  y  $\delta\text{ NH}$ ),  $1468\text{ cm}^{-1}$  ( $\nu\text{ C=C}$  y  $\delta\text{ CH}$ ),  $1341\text{ cm}^{-1}$  ( $\nu\text{ C-C}$ ) y  $749\text{ cm}^{-1}$  ( $\text{C-C-C}$ )” (Saito et al., 2020, p.7).



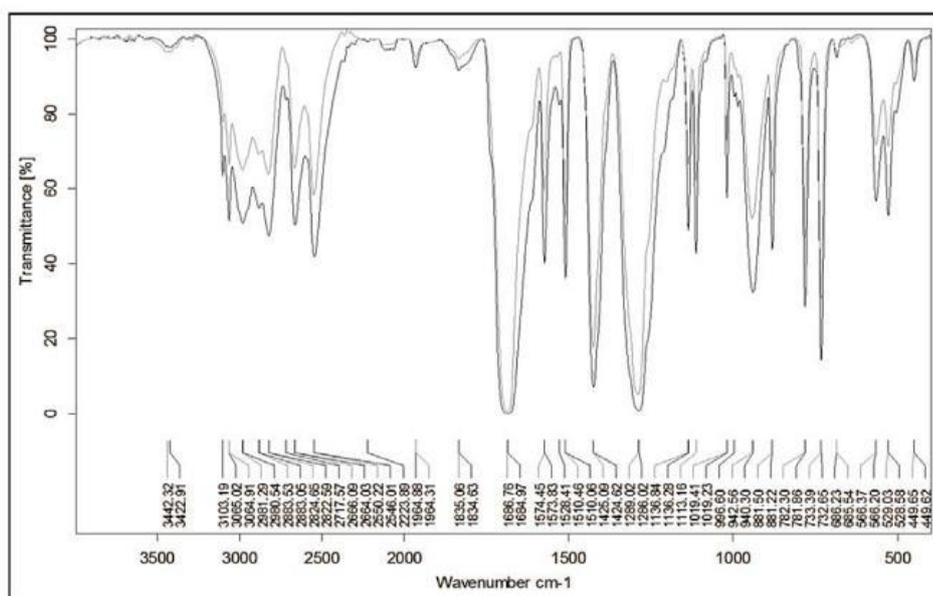
**Figura 18-2.** FTIR de la quinacridona

Fuente: Saito et al. 2020, p. 8.

#### 2.8.4. Análisis físico-químico de la fracción despolimerizada

##### 2.8.4.1. Espectroscopía Infrarroja FT-IR

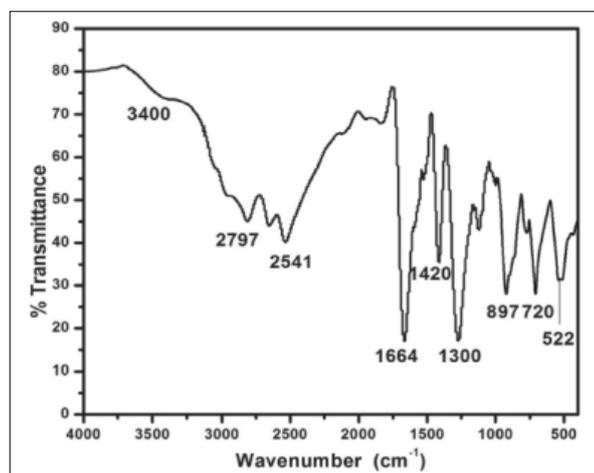
Para determinar y ratificar la presencia de los grupos funcionales de la sustancia obtenida, se ha empleado la espectroscopía FT-IR, el principio empleado es similar al indicado en el literal 2.8.1.2. Las siguientes figuras se representa el espectro del ácido tereftálico obtenido por dos estudios previos.



**Figura 19-2.** Espectro FT-IR del Ácido Tereftálico estándar (-), Acido tereftálico obtenido de la despolimerización (-)

Fuente: Căta et al., 2017, p.534.

Según (Căta et al., 2017, p.534), el TPA presenta vibraciones característica que se encuentran en los siguientes longitudes de onda:  $\sim 3065\text{cm}^{-1}$  ( $\nu_{C-H\text{ arom}}$ ),  $\sim 1685\text{cm}^{-1}$  ( $\nu_{C=O}$ ),  $\sim 1575, 1510, 1110\text{cm}^{-1}$  (1,4 sustitución del anillo de benceno) y  $\sim 1285\text{cm}^{-1}$  ( $\nu_{C-O}$  del grupo carboxilo)



**Figura 20-2.** Espectro IR del Ácido tereftálico

Fuente: Singh et al., 2018, pp.5804-5809.

Los picos de absorción a  $3400\text{ cm}^{-1}$ ,  $2797\text{ cm}^{-1}$ ,  $2541\text{ cm}^{-1}$ ,  $1420\text{ cm}^{-1}$ , y  $1300\text{ cm}^{-1}$ , son pertenecientes a grupos carboxílicos. Los picos característicos de los anillos aromáticos se han observado a  $700\text{-}800\text{ cm}^{-1}$ . El pico característico de carbonilo a  $1700\text{ cm}^{-1}$ , se ha desplazado

hacia un valor de número de onda más bajo,  $1664\text{ cm}^{-1}$ , lo que sugiere que la unión al carbonilo es más débil. Dichos picos confirman la presencia de ácido tereftálico y cierta pureza del producto final obtenido (Singh et al., 2018, pp.5804-5809).

### **Materiales**

- Algodón
- Brocha

### **Reactivos**

- Fracción sólida
- Alcohol

### **Equipos**

- Espectrofotometro FT-IR

### **Procedimiento**

El procedimiento detallado en la sección 2.8.1.2 es el mismo empleado para la caracterización de la fracción sólida obtenida de la hidrólisis alcalina del tereftalato de polietileno.

#### *2.8.4.2. Pruebas de solubilidad*

La solubilidad se refiere al grado con el que una sustancia logra disolverse en un solvente para que conjuntamente con el soluto, formar una solución. La solubilidad de un fluido, líquido o gas, puede ser de dos tipos, parcial o completa. Por lo general, al aumentar la temperatura la solubilidad de los sólidos en los líquidos también aumenta. En el caso de los gases, la presión y la solubilidad son proporcionales, pero no con la temperatura (Britannica, 2018, párr.1).

Para la prueba de solubilidad se han empleado 0,1 g del producto obtenido de la despolimerización conjuntamente con 2mL de cada uno de los cinco solventes.

**Tabla 4-2:** Pruebas de solubilidad

<b>Orden de la muestra</b>	<b>Solvente</b>	<b>Peso molecular (g/mol)</b>
<b>1</b>	Alcohol etanol 96°	46,07
<b>2</b>	Agua Destilada	18,01528
<b>3</b>	Hexano 99,8%	86,18
<b>4</b>	Cloroformo	199.38
<b>5</b>	Ácido Acético	60,052

Realizado por: Sánchez, M.2021.

### **Materiales**

- Tubos de ensayo
- Gradilla
- Varilla de agitación
- Pipeta
- Espátula
- Corcho
- Vidrio reloj

### **Reactivos**

- Muestra fracción sólida
- Agua destilada
- Ácido acético
- Benceno
- Alcohol etanol
- Cloroformo

### **Equipos**

- Balanza analítica
- Campana de extracción

## **Procedimiento**

- Lavar cuidadosamente cada uno de los materiales.
- Colocar 2mL de alcohol etanol en un tubo de ensayo conjuntamente con 0,1 gr de la muestra.
- Tapar todos los tubos de ensayo con un corcho para proceder con la agitación manual por 20 segundos.
- Dejar reposar por 15 segundos y se registrar las observaciones obtenidas
- Se repite el procedimiento con los demás solventes

### *2.8.4.3. Análisis estadístico*

El análisis estadístico es una ciencia que se encarga de juntar, explorar, analizar un conjunto de datos e interpretar un fenómeno en estudio. Con el análisis estadístico se identifican patrones y tendencias subyacentes que presentan dichos valores, se elimina cualquier sesgo al revisar la información (Brooks, 2020, párr.3).

Para analizar la relación y efecto de incidencia de los valores obtenidos en la investigación, se ha empleado el análisis ANOVA de dos factores. Las variables a analizar son: color del plástico, diámetro de partícula y % de despolimerización. De las tres variables se selecciona aquel plástico, en función de su color y diámetro, más óptimo para la hidrólisis alcalina.

La razón para emplear el análisis ANOVA bidireccional es para valorar cómo se da el cambio de la media de una variable cuantitativa acorde a dos variables categóricas o independientes. Las dos variables a emplear deben ser categóricas, en caso de que una de dichas variables sea cuantitativa, se emplea un análisis de ANCOVA (Brooks, 2020, párr.8).

### **Análisis ANOVA de dos factores**

El análisis de varianza, ANOVA, es una técnica estadística empleada para el análisis de las diferencias entre las medias de tres o más grupos. El objetivo primordial de un análisis ANOVA de dos factores es entender si existe una interacción entre dos variables independientes (color y diámetro) con la variable dependiente (% de despolimerización y % de rendimiento).

Cuando se verifica que, por el estadístico F del ANOVA, se presentan diferencias significativas es posible establecer pruebas para determinar en qué lugar están presentes dichas diferencias entre las medias, por medio de comparaciones múltiples “post hoc” (López y Fachelli, 2018, pp.54-63).

El medio de comparación empleado en el presente trabajo, es el Test de Tukey, debido que aquí se emplean todas las comparaciones posibles del diseño. Cuando es rechazada la hipótesis nula

básica de igualdad de las medias obtenida del análisis ANOVA, se emplea el test de comparaciones múltiples, Test Tukey.

### **Test de TUKEY**

El test de Tukey HSD (Diferencia Honesta Significativa, HSD) se emplea para comprobar una hipótesis experimental, por medio de la determinación de la relación existente entre dos conjuntos de datos. La prueba TUKEY es un test post hoc, es decir, se realiza la comparación después de que los datos hayan sido recolectados (Beck, 2018, párr.1-2).

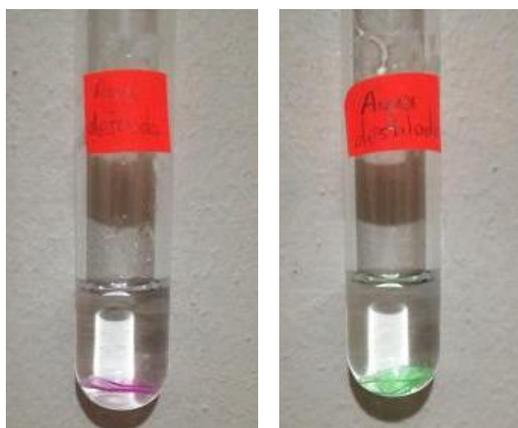
## CAPÍTULO III

### 3. MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Caracterización de la muestra de plástico

##### 3.1.1. Test clásico de identificación

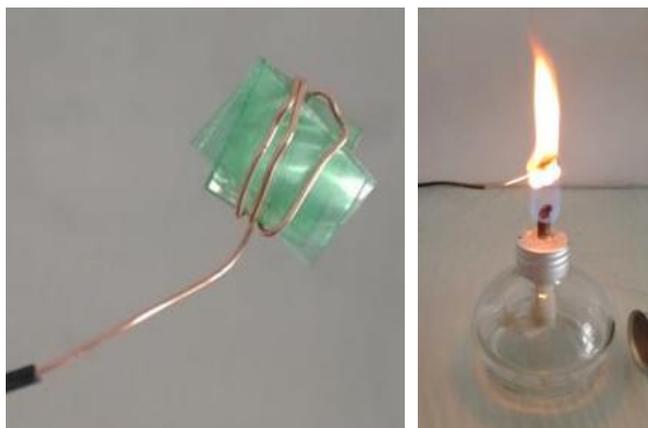
Con el test de agua, se observó que la muestra NO FLOTA al estar en contacto con agua destilada, estimando así que la densidad de la muestra es superior a  $997 \text{ Kg/m}^3$ . Por lo tanto, se afirma que acorde a la tabla 13-2, el plástico en estudio no es polietileno de alta densidad, polietileno de baja densidad ni polipropileno.



**Figura 1-3.** Test de agua

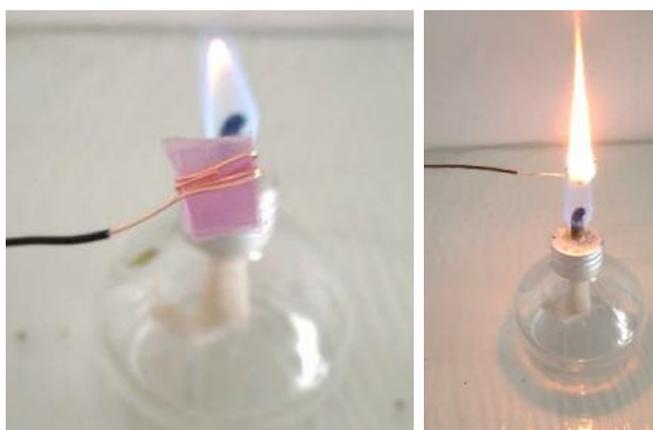
Fuente: Sánchez, M.2021.

Consecuentemente, se inició el Test de Beilstein, con el cual se identificó la presencia de una llama naranja en lugar de una verde, indicando así, que la muestra de plástico NO posee un elemento halógeno en su composición (PVC)



**Figura 2-3.** Test de Beilstein (Plástico verde)

Fuente: Sánchez, M.2021.



**Figura 3-3.** Test de Beilstein (Plástico rosado)

Fuente: Sánchez, M.2021.

Con el test de acetona, no se evidenció ninguna reacción aparente, es por ello que se descarta que el plástico en estudio sea poliestireno (PS).



**Figura 4-3.** Test de acetona

Fuente: Sánchez, M.2021.

Finalmente, con ácido sulfúrico si se evidenció un desgaste en el plástico, indicando así la presencia de una reacción química.

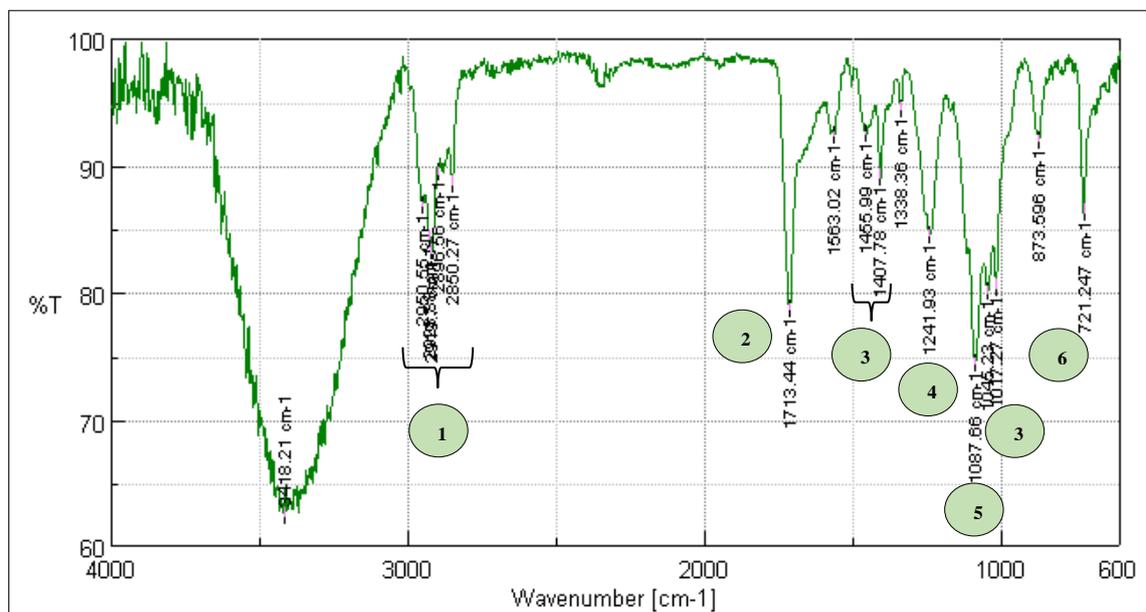


**Figura 5-3.** Test de ácido Sulfúrico

Fuente: Sánchez, M.2021.

Al juntar el ácido sulfúrico con el plástico se da lugar a la formación de un precipitado blanco, como resultado de la hidrólisis ácida provocada al plástico PET, se da una disolución completa el material (Suasnavas, 2016, p.38).

### 3.1.2. Espectroscopia infrarroja del plástico



**Figura 6-3.** FT-IR Plástico verde

Fuente: Sánchez, M.2021.

**Tabla 1-3:** Análisis del espectro IR del Plástico PET verde

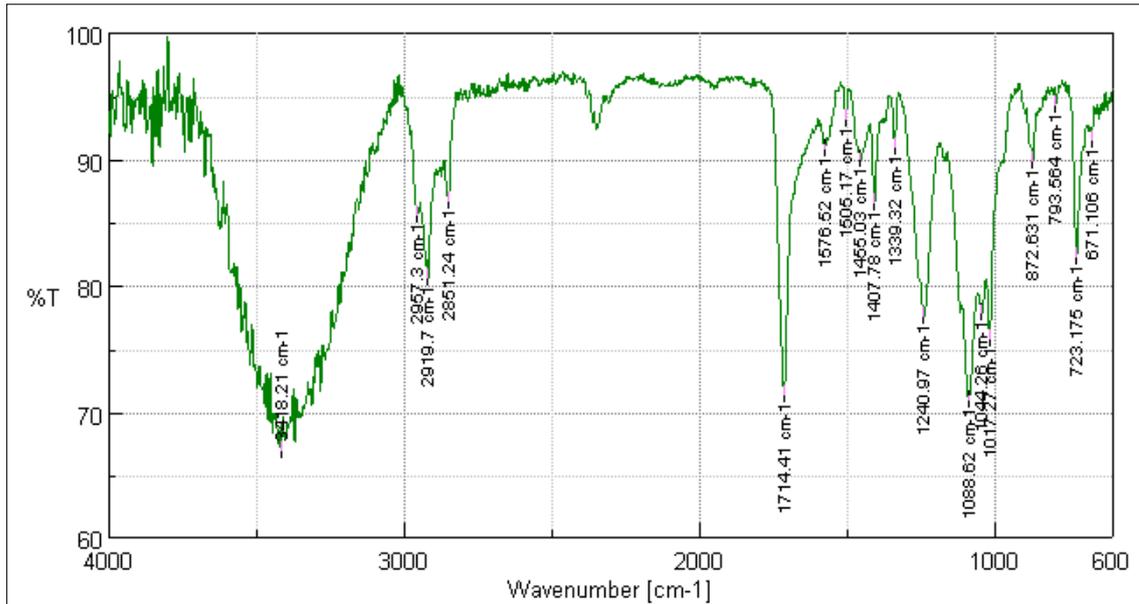
Zona	Grupo funcional /banda	Espectro	
		Número de onda ( $cm^{-1}$ )	Transmitancia %
1	Grupo alifático C-H	2950.55	86.8107
		2928.38	84.2269
		2919.7	83.172
		2896.56	89.431
		2850.27	88.555
2	Estiramiento del carbonilo C=O	1713,44	78,644
3	Segmento del etilenglicol y presencia de $CH_2 -$	1455,99	92,480
		1407,78	89,072
		1017,27	80,375
4	Grupo tereftalato	1241,93	84,5359
5	Vibración de la banda éster C-O	1087.66	74.3276
6	Vibración =C-H del anillo de benceno	873,596	92,0347
		721,247	86,234

Elaborado por: Sánchez, M.2021.

Para la **zona 1** se tiene la presencia del estiramiento simétrico alifático de la unión C-H correspondiente al grupo alquilo ( $3000-2850$ )  $cm^{-1}$ . La **zona 2** indica el estiramiento del carbonilo C=O atribuido a las vibraciones del carbonilo de ésteres saturados en el rango de ( $1780-1650$ )  $cm^{-1}$ , el cual es el pico más característico y relevante para la identificación del tereftalato de polietileno. En la **zona 3**, se tiene una banda con un valor muy cercano al presentado en el estudio (Silva et al., 2019, p.4) relacionadas con la deformación asimétrica de  $CH_2 -$ .

Al analizar y comparar el trabajo de (Dos Santos et al., 2017, p.413) para la **zona 4** se presenta una banda de  $1241,93$   $cm^{-1}$  correspondiente a la absorción específica del grupo tereftalato  $OOC - C_6H_4 - COO$  así como también la **zona 5** a  $1087,66$   $cm^{-1}$ , la cual está asociada con el modo de vibración de estiramiento de los enlaces C-O.

En la **Zona 6** se aprecia una longitud de onda de ( $873,596$  y  $721,247$ )  $cm^{-1}$  correspondiente a la vibración “=C-H” del anillo de benceno. De acuerdo a (Dos Santos et al., 2017, p.413), el espectro perteneciente al PET se confirma por este pico, debido a que es atípico para aromáticos disustituídos ( $860-780$ )  $cm^{-1}$  y se debe a la interacción del grupo de ésteres polares y el anillo de benceno.



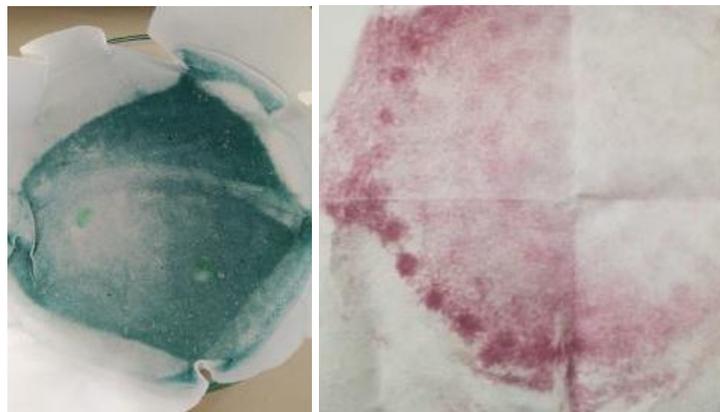
**Figura 7-3.** FT-IR Plástico Rosado

Fuente: Sánchez, M.2021.

Como se puede observar en la figura 43-3 y 44-3 se determina que ambos espectros tienen picos muy parecidos, estableciendo así que efectivamente se trata del plástico tipo PET.

### 3.2. Resultados de la hidrólisis alcalina

#### 3.2.1. Fracción sólida NO Despolimerizada

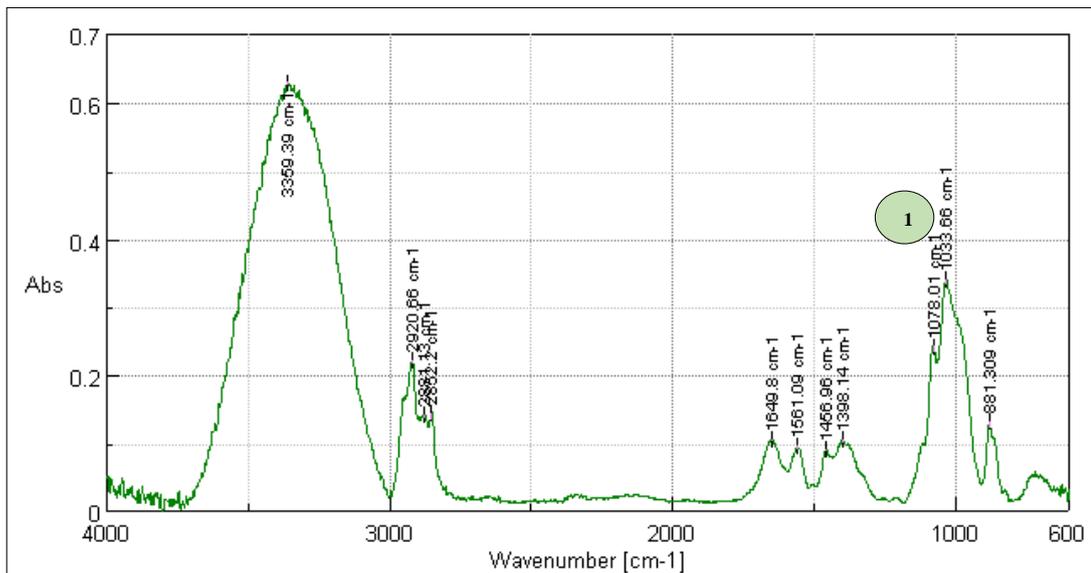


**Figura 8-3.** Fracción NO Despolimerizada

Fuente: Sánchez, M.2021.

En la Fracción sólida NO despolimerizada se obtuvo el pigmento correspondiente a cada plástico así como la fracción de plástico que no se ha logrado despolimerizar en la hidrólisis alcalina. Por medio de la espectroscopia FT-IR se ha determinado que el colorante empleado en los plásticos

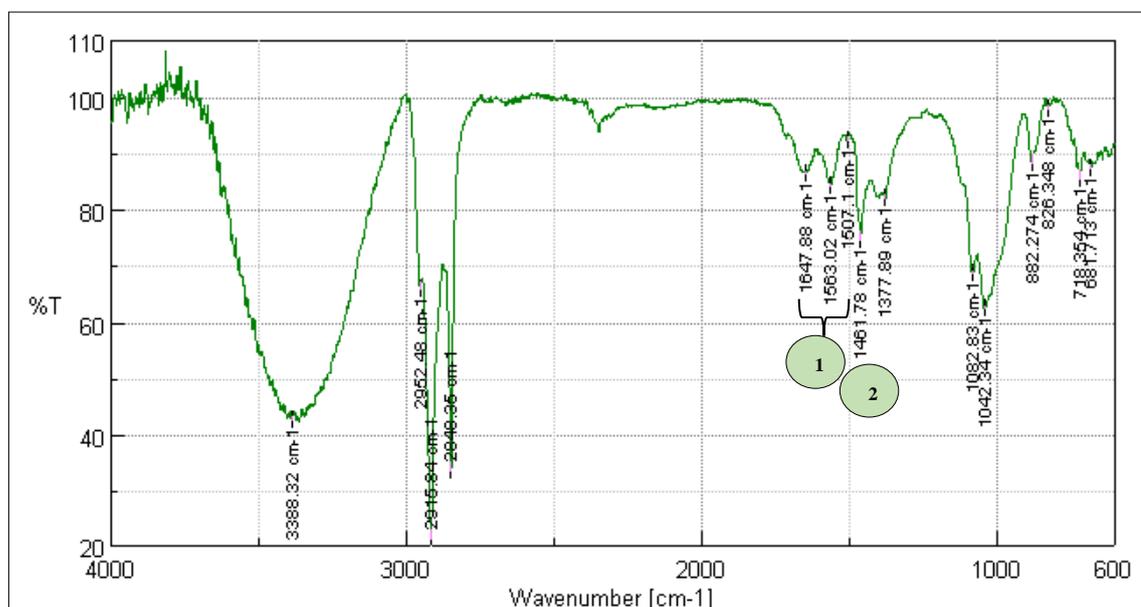
corresponde a un pigmento orgánico, quinacrina en el caso del pigmento violeta y ftalocianinas para el pigmento verde. Los espectros de cada pigmento son detallados a continuación:



**Figura 9-3.** Pigmento Verde

Fuente: Sánchez, M.2021.

Considerando los valores obtenidos para las bandas acorde artículo de (Zina et al., 2018, p.5) se tiene en la zona 1 el pico característico de la ftalocianina esquelética con un valor de  $1078,01\text{ cm}^{-1}$ . Es por ello que se afirma que el espectro corresponde al pigmento perteneciente a la familia de las ftalocianinas.



**Figura 10-3.** Pigmento Rosado

Fuente: Sánchez, M.2021.

Quinacridona (QA), es etiquetado por Color Index internacionalmente como PV19, es el compuesto primordial de esta familia que es usado para dar una coloración violeta, entre sus aplicaciones principales se tiene en pinturas, aplicaciones superficiales en plásticos y textiles, e/o. QA se caracteriza por la presencia del enlace de hidrogeno NH-O. En el espectro correspondiente a la investigación de (Del Puerto et al., 2014, p.755) se tiene bandas en 3473, 3413, 3258 y 3221  $cm^{-1}$  correspondientes a los grupos N-H. las primeras bandas corresponden a vibraciones simétricas y asimétricas  $\nu(NH)$ . Las dos últimas, son asignadas al grupo  $\nu(NH)$  cuando el mismo interactúa con grupos carbonilo.

El colorante empleado para dar la tonalidad “rosada” al plástico, es un pigmento violeta con dos alternativas, la primera es un compuesto orgánico perteneciente a la familia de las quinacrinonas o un pigmento inorgánico con un metal en su estructura. Al comparar el espectro obtenido en la figura 45-3 con el espectro FT-IR del plástico tipo PET, claramente se puede evidenciar que entre la zona comprendida de 3000-4000  $cm^{-1}$  únicamente se puede observar la presencia de un grupo hidroxilo, a pesar de que no es observable un grupo amino secundario en dicha longitud, si se puede evidenciar que entre 1650 y 1580  $cm^{-1}$  dos picos ligeramente anchos y juntos, los cuales son característicos de aminas primarias, dichas bandas se encuentran en 1647.88 y 1563.02  $cm^{-1}$  (**Zona 1**), confirmando así la presencia de la quinacridona.

Las demás bandas del espectro del pigmento están claramente relacionadas con residuos del plástico PET; incluso en la zona cinco del espectro del plástico se encuentra el grupo tereftalato y en el espectro del pigmento rosado, NO es observable dicha banda, estableciendo así la despolimerización fue llevada satisfactoriamente. Además de ello, no se aprecia una banda pronunciada característica de la unión C-M (metal).

De acuerdo a lo estipulado a (Saito et al., 2020, p.7) para la identificación de la quinacridona también se presenta el pico de 1468  $cm^{-1}$  que es atribuido a ( $\nu C = C$  y  $\delta CH$ ). De igual manera en la presente investigación se encontró en la **zona 2** un pico de 1461,78  $cm^{-1}$ .

Son necesarios materiales con un porcentaje de pureza y peso molecular muy alto para ser empleado en aplicaciones de envasado de alimentos. Los pigmentos inorgánicos son empleados comúnmente en la industria del plástico, a pesar de que no posea el brillo ni la misma intensidad de color que ofrece los pigmentos orgánicos. La mayoría de los pigmentos inorgánicos son demasiado tóxicos debido a que son óxidos de metales pesados, tales como: cadmio, níquel, plomo y cromo. Es por tanto que, los pigmentos y otros aditivos que poseen en su estructura Pb,Cr (VI), Hg, Cd no se pueden utilizar en envases (Selke et al., 2016, p.173).

Aquellos plásticos que son empleados para el contacto con alimentos o para elaborar juguetes, es necesario establecer la cantidad de los hidrocarburos aromáticos policíclicos de cada producto. Los pigmentos policíclicos más representativos son: quinacridona (rojo/violeta) y Ftalocianina (azul/verde) (Baur et al., 2019, p.588).

Es por esta razón, que se afirma que los dos espectros de las figuras 46-3. y 47-3. corresponden a pigmentos orgánicos, específicamente destinados para el envasado de alimentos.

### 3.2.2. *Fracción sólida Despolimerizada*



**Figura 11-3.** Ácido Tereftálico

Fuente: Sánchez, M.2021.

El producto sólido obtenido finalmente corresponde a un polvo blanquecino con muy poco brillo, pero con las características suficientes para determinar que la sustancia corresponde al ácido tereftálico obtenido de la hidrólisis alcalina.

#### 3.2.2.1. *Rendimiento del Proceso*

Para el porcentaje de despolimerización se ha empleado la ecuación 1-2, la fracción sólida A corresponde al PET no degradado, así como el pigmento del plástico. El cálculo del porcentaje de rendimiento del proceso, se ha calculado en función de la masa final tanto experimental (real) como teórica. La fracción sólida B, pertenece a la masa de ácido tereftálico obtenido.

En las tablas 17-2. y 18-2. se presenta el porcentaje de despolimerización y el porcentaje de rendimiento obtenido para cada uno de los 16 ensayos realizados en función del color de plástico, así como el tamaño del pellet.

**Tabla 2-3:** Porcentaje de despolimerización

FRACCIÓN	Verde				Rosado			
	5mm		10mm		5mm		10mm	
	Masa (g)	(%) Dp						
Sólida PET Despolimerizado	0,2035	96,043	0,3030	93,960	0,2151	95,008	0,5138	89,790
	0,1726	98,176	0,3221	93,610	0,1869	96,151	0,8925	82,210
	0,2797	94,440	0,4067	91,930	0,1149	96,696	0,7601	85,040
	0,2120	95,790	0,4173	92,480	0,1958	95,892	0,6771	86,530

Realizado por: Sánchez, M.2021.

**Tabla 3-3:** Rendimiento de la hidrólisis alcalina

FRACCIÓN	Verde				Rosado			
	5mm		10mm		5mm		10mm	
	Masa (g)	%R						
Sólida Ácido Tereftálico	4,1536	96,093	4,0207	93,018	4,1239	95,405	4,0463	93,610
	4,1721	96,521	3,9925	92,366	4,1562	96,153	3,8065	88,062
	4,1399	95,776	3,9011	90,251	4,2005	97,178	3,8836	89,846
	4,1925	96,992	4,0611	93,953	4,1136	95,167	3,9438	91,239

Realizado por: Sánchez, M.2021

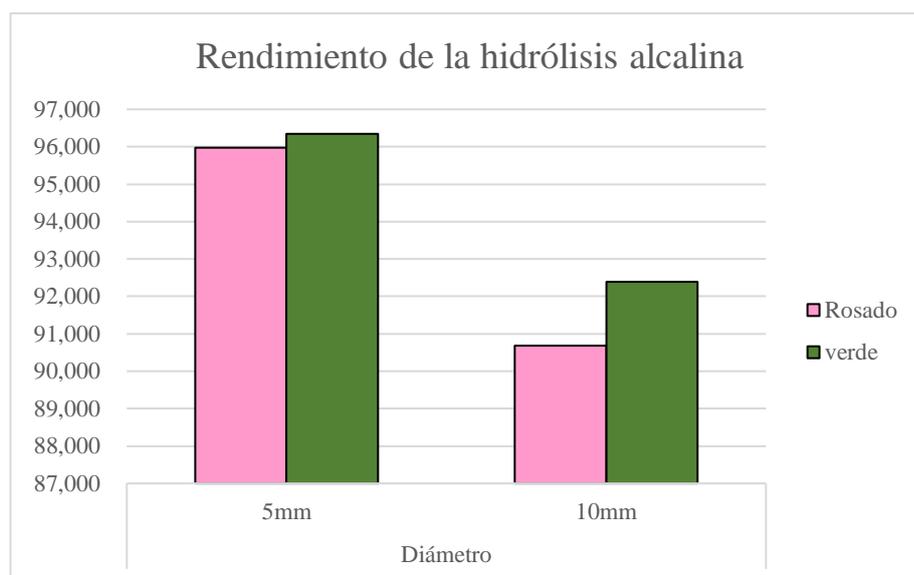
**Tabla 4-3:** Rendimiento promedio

COLOR	DIÁMETRO	
	5mm	10mm
Rosado	95,976	90,689
verde	96,345	92,397

Realizado por: Sánchez, M.2021.

En la tabla 19-3. se presentan de manera general y para fundamentos de comparación, el rendimiento promedio obtenido de la hidrólisis alcalina del PET influenciado tanto por el diámetro de partícula como por el color del plástico.

En las tablas correspondientes al porcentaje de despolimerización y de rendimiento se ha encontrado que, el mejor porcentaje en ambos aspectos está claramente relacionado con el tamaño de partícula el plástico, así como el pigmento. En la presente investigación corresponde a un valor de 5mm, tanto para el plástico verde como plástico rosado. El rendimiento promedio de los datos obtenidos es superiores al 90% en comparación con los valores que se han encontrado en la investigación de (Căta et al., 2017, p.533). De igual manera, en función del color del plástico, tal como se puede evidenciar en el documento descrito por (Dos Santos et al., 2018b, p.9), el plástico con pigmento verde posee un rendimiento superior en comparación con el plástico con pigmento rosado.



**Figura 12-3.** Rendimiento de la hidrólisis alcalina

Realizado por: Sánchez, M.2021.

En la figura 49-3 se tiene la tendencia que presenta el rendimiento de la reacción en función del diámetro de partícula. Como se puede observar a medida que disminuye el diámetro de partícula,

el rendimiento obtenido es mayor. Obteniendo un menor rendimiento con el PET de color rosado y tamaño de partícula de 10mm con un valor de 90,689%. Por otra parte, el mejor porcentaje obtenido es con el plástico de color verde de 5mm, cuyo porcentaje es de 96,345%.

El fenómeno descrito en el párrafo anterior se debe a que la velocidad de reacción de la hidrólisis alcalina es proporcional al área superficial de la partícula. Las partículas de PET con alta área superficial (tamaño de partícula pequeña) conlleva a que exista una mayor interacción entre el hidróxido de sodio y el tereftalato de polietileno. Es decir, la tasa de reacción es mayor para el tamaño de partícula mínimo (Bhogle y Pandit, 2018, p.131).

De acuerdo a (Dos Santos et al., 2018, p.6), el rendimiento del proceso también se ve influenciado por el color seleccionado del plástico. Como ya se mencionó con anterioridad los envases plásticos de PET se obtienen adicionando colorantes al polímero con la finalidad de brindarles, a más de una buena presentación comercial, proteger el contenido de las botellas de la radiación ultravioleta. Del amplio grupo de pigmentos empleados para dicha función, los pigmentos orgánicos son los más destacados, pertenecientes a la ftalocianina, antraquinona y quinacridona. Comparando una hidrólisis alcalina entre PET incoloro y PET de color, se encuentra que tanto el rendimiento como la pureza es inferior en el plástico de color. Este fenómeno se debe a que la presencia de los pigmentos afecta el proceso de despolimerización, los pigmentos presentan carbonos electrofílicos en sus estructuras moleculares lo que disminuye la posibilidad de un ataque directo por parte de hidróxido (nucleófilo) a los carbonos electrofílicos que presenta la molécula de PET (Dos Santos et al., 2018, p.7).

Dado que la cantidad de NaOH presenten en la reacción, disminuye debido a la reacción química con los tintes presenten en el plástico, esto conduce a un menor porcentaje de despolimerización, este resultado da una idea de la formación de dímeros, trímeros y polímeros del propio material PET. Por lo tanto, estas especies químicas contribuyen a la reducción de la pureza del ácido tereftálico (Dos Santos et al., 2018, p.7).

### *3.2.2.1. Análisis Estadístico*

Para el análisis estadístico se han empleado un análisis de varianza ANOVA, por medio del método de Tukey empleando para ello, el software InfoStat. Se ha tomado en cuenta las variables de clasificación el Color y Diámetro, mientras que la variable dependiente el porcentaje de despolimerización. Considerando la premisa anterior, se ha obtenido el siguiente resultado:

Análisis de la varianza					
Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV	
%DP	16	0,87	0,83	2,01	

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	270,40	3	90,13	26,02	<0,0001
COLOR	55,18	1	55,18	15,93	0,0018
DIÁMETRO	169,30	1	169,30	48,87	<0,0001
COLOR*DIÁMETRO	45,93	1	45,93	13,26	0,0034
Error	41,57	12	3,46		
Total	311,97	15			

**Figura 13-3.** Análisis Anova

Fuente: Sánchez, M.2021.

**Donde:**

*FV* =Factores/Variables

*SC*= Suma de cuadrados

*gl*= Grados de libertad

*CM*=Media cuadrática

*F* = razón F

*p*= Probabilidad

El valor obtenido de  $R^2$  correspondiente a 0,87 demuestra que los tres efectos establecidos para el modelo (color, diámetro y la interacción “color y diámetro”) explican el 87% de la varianza de la variable dependiente.

Tal como se presenta en la figura 50-3, se obtiene un p-valor para la variable “color”, “diámetro” e “interacción color y diámetro” menor a 0,05 con valores de: 0,0018; 0,0001 y 0,0034 respectivamente. Demostrando así que, efectivamente existe una relación o diferencias estadísticamente significativas entre los dos colores: verde y rosado, así como el diámetro de partícula: 5mm y 10mm conjuntamente con el % despolimerización. La hipótesis nula es eliminada, mientras que la hipótesis del investigador (hipótesis alterna) es aprobada. Es decir, por lo menos una de las medias obtenidas es distinta de cero, influyendo significativamente en el resultado.

**Test de TUKEY**

Las condiciones para el test de TUKEY son:

- $\alpha = 0,05$
- Diferencias mínimas significativa,  $DMS=2,02759$

- Grados de libertad,  $gl = 12$
- Error = 3,4640

```

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=2,02759
Error: 3,4640 gl: 12
COLOR Medias n E.E.
-----
rosado 90,84 8 0,66 A
verde 94,55 8 0,66 B
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=2,02759
Error: 3,4640 gl: 12
DIÁMETRO Medias n E.E.
-----
10mm 89,44 8 0,66 A
5mm 95,95 8 0,66 B
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

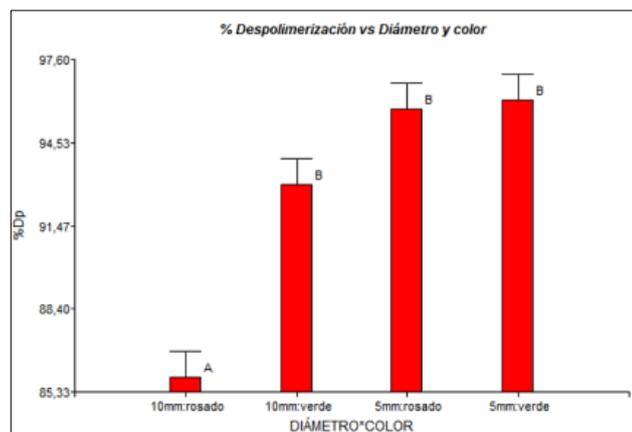
Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=3,90724
Error: 3,4640 gl: 12
COLOR DIÁMETRO Medias n E.E.
-----
rosado 10mm 85,89 4 0,93 A
verde 10mm 93,00 4 0,93 B
rosado 5mm 95,79 4 0,93 B
verde 5mm 96,11 4 0,93 B
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

```

**Figura 14-3.** Test Tukey

Fuente: Sánchez, M.2021.

En particular, como se puede demostrar en el Test de Tukey correspondiente al efecto del diámetro de partícula y el color del plástico en el porcentaje de despolimerización, efectivamente si existe diferencias estadísticamente significativas. Por otra parte, para el Test Tukey de la interacción entre “Color y diámetro” se ha encontrado que, para el color verde de 10mm, rosado de 5mm y rosado de 10mm no se presentan diferencias significativas. Pero entre rosado de 10mm y las interacciones antes mencionadas si se observan diferencias entre ellas.



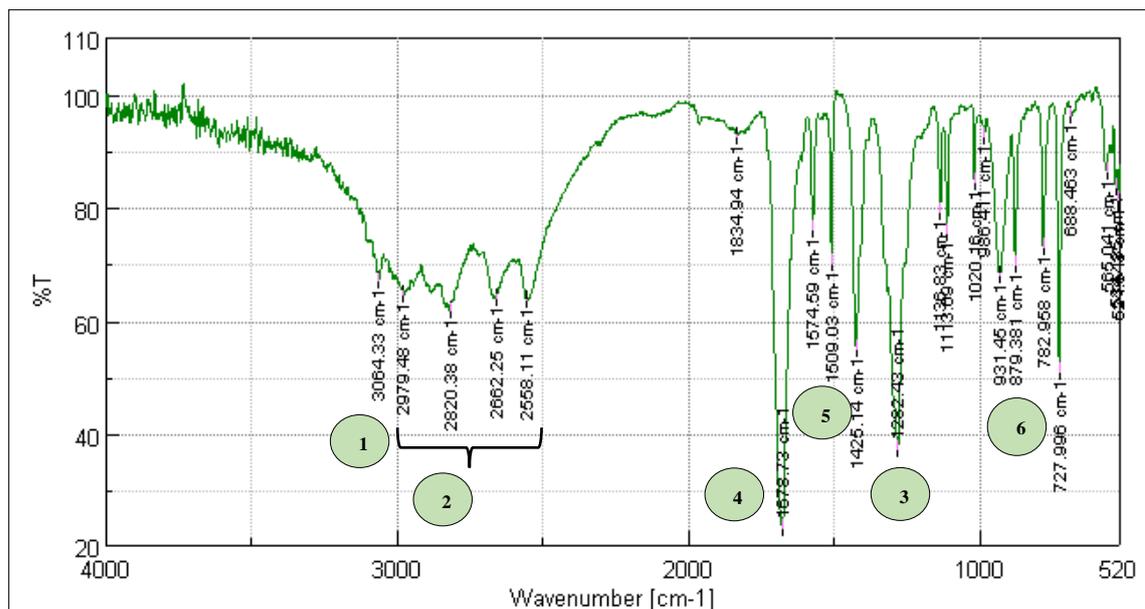
**Figura 15-3.** Gráfica Test de Tukey (Interacción)

Fuente: Sánchez, M.2021.

Al analizar la heterogeneidad demostrada entre los grupos, se ha encontrado que los parámetros óptimos para la hidrólisis alcalina son: color del plástico: **verde** y diámetro de partícula: **5mm**. Dicha premisa se justifica en:

- Se afirma acorde con la figura representativa del Test de Tukey, el rendimiento máximo de la reacción se da con el plástico de 5mm y color verde, seguido a ello, se tiene en segundo lugar al plástico rosado de 5mm. Como se señaló en el apartado 3.2.2.1, el rendimiento de la reacción está directamente relacionado tanto con el diámetro de la partícula como con el color, siendo así, 5mm y color verde las condiciones adecuadas para tener el mejor porcentaje de despolimerización.
- Para la interacción entre: 10mm: verde, 5mm: rosado, 5mm: verde, es evidente que no presentan diferencias estadísticamente significativas. En otras palabras, si se trabaja con las interacciones antes establecidas no se tendrán valores que se diferencien relativamente entre ellos. Sin embargo, la investigación en proceso también ha considerado que la elección de 5mm: verde se justifica en el carácter electrofílico y nucleofílico que presentan el NaOH, PET y el color. Además de ello, a menor área superficial, mejor será el ataque del NaOH a las moléculas de plástico. A 5mm: verde se obtiene un porcentaje de despolimerización promedio de 96,11225.

### 3.2.2.2. Caracterización del ácido tereftálico



**Figura 16-3.** Espectro IR del Ácido Tereftálico

Fuente: Sánchez, M.2021.

**Tabla 5-3:** FT-IR del Ácido Tereftálico

Zona	Grupo funcional	Espectro	
		Número de onda ( $cm^{-1}$ )	Transmitancia %
1	Aromáticos (s)	3064,33	66,9869
		1282,43	37,1661
2	Ácidos Carboxílicos (m)	2979.48	64.4411
		2820.38	61.8061
		2662.25	63.9755
		2558.11	63.5304
3	Banda C-O del ácido carboxílico	1282,43	37,1661
4	Grupo Carbonilo (s)	1678.73	23.0812
5	Sustitución 1,4 del anillo de benceno	1509.03	70.0036
		1574.59	75.9288
6	Posición “para” del grupo carboxilo en el anillo de benceno	782.958	72.8284

Nota: m= medio, s= fuerte

Elaborado por: Sánchez, M.2021.

En la **zona 1** se tiene el pico con número de onda correspondiente a  $3064,33\text{ cm}^{-1}$ , el cual se encuentra en el intervalo de  $3100\text{-}3000\text{ cm}^{-1}$ , indicando la presencia de un grupo aromático fuerte. La **zona 2** corresponde a bandas -OH de los ácidos carboxílicos con los siguientes picos:  $2979,48\text{ cm}^{-1}$ ;  $2820,38\text{ cm}^{-1}$ ;  $2662,25\text{ cm}^{-1}$ ;  $2558,11\text{ cm}^{-1}$ , los cuales se encuentran dentro del rango:  $3300\text{-}2500\text{ cm}^{-1}$ . Para el pico a  $1282,43\text{ cm}^{-1}$ , correspondiente a la **zona 3**, se tiene la banda C-O del ácido carboxílico en el intervalo de  $1320\text{-}1000\text{ cm}^{-1}$ .

Al considerar la presencia de un enlace carbonilo débil encontrado por (Singh et al., 2018, pp.5807-5808) y comparando dicho valor con el registrado por la investigación en curso, se encontró el pico característico de una banda de estiramiento C=O en el grupo carboxilo a  $1678.73\text{ cm}^{-1}$  ubicado en la **zona 4**.

Si la absorción posee valores mucho mayores a  $1700\text{ cm}^{-1}$  se evidencia la presencia del grupo carbonilo en un éster. Sin embargo, en el espectro en estudio se tiene un valor inferior al estándar, por lo cual se logra un análisis de los componentes del ácido tereftálico.

En la **zona 5** se tiene valores correspondientes a la sustitución 1-4 del anillo de benceno con valores de  $1509,03\text{ cm}^{-1}$  y  $1574,59\text{ cm}^{-1}$ , valores muy similares a lo que indica (Căta et al., 2017, p.537). Por último, en la **zona 6** se presenta un pico de  $782.958\text{ cm}^{-1}$ , dicho valor se encuentra en el intervalo de  $860\text{-}780\text{ cm}^{-1}$ , el cual es propio de anillos benceno “para- sustituidos”. Acorde a todas las señales encontradas se afirma que efectivamente al espectro analizado corresponde al Ácido Tereftálico.

### 3.2.2.3. Prueba de solubilidad

Para la prueba de solubilidad se han empleado cinco solventes diferentes, al estar en contacto el ácido tereftálico con: etanol, agua destilada, hexano, ácido acético y cloroformo se forman dos fases indicando así que el monómero obtenido de la despolimerización es prácticamente insoluble en los solventes empleados. Es por ello que, se justifica y reafirma que el producto obtenido de la hidrólisis efectivamente posee las propiedades esperadas. El ácido tereftálico es una sustancia muy poco soluble cuando está en presencia de solventes orgánicos y aumenta conforme se incrementa la temperatura (Matuszek et al., 2020, p.1).



**Figura 17-3.** Solubilidad del Ácido Tereftálico.

**Fuente:** Sánchez, M.2021.

El peso molecular del ácido tereftálico es de 166,13 g/mol. Los ácidos orgánicos con un peso molecular bajo son considerados como sustancias solubles. Cuanto más átomo de C tenga un ácido carboxílico, la solubilidad de dichos ácidos disminuye; así mismo el grupo carboxilo pierde importancia en relación al resto de la molécula. Desde el ácido dodecanóico, los ácidos carboxílicos son blancos, insolubles en agua y sólidos (Comejo, 2017, párr.8-17).

La solubilidad del ácido tereftálico es respectivamente baja cuando está en contacto con el ácido acético con un valor estimado de 0.013g/100g de disolvente. Para el agua es de 0,0017g/100g de solvente. Es considerado insoluble en agua, éter, cloroformo y vinagre. A pesar de que el ácido 1,4-benzenodicarboxílico posee una solubilidad muy baja no imposibilita que pueda absorber cantidad diminutas de moléculas de agua contenidas en el aire, las cuales se disuelven en el ácido. Para que el Ácido Tereftálico, a bajas y moderadas temperaturas, reaccione con alcoholes simples, requiere de un catalizador ácido fuerte; para altas temperaturas no necesita de un catalizador (Polito, Cirio y Salas, 2016, p.26).

### 3.3. Pruebas de hipótesis

#### 3.3.1. *Hipótesis general*

- Por medio de la hidrólisis alcalina, el tamaño de partícula podría llegar a influir en la despolimerización del Tereftalato de polietileno (PET)

**Tipo de hipótesis:** Descriptiva

En este caso, el tamaño de la partícula PET cumple un papel determinante en la hidrólisis alcalina. Tal es el caso que, influye significativamente en el porcentaje de despolimerización, así como en el rendimiento, siendo los dos aspectos muy importantes para conocer la evolución del fenómeno. La eficiencia del reciclaje químico del PET se puede optimizar si el tamaño de partícula del pellet se reduce aun por debajo de 0,05cm. El tamaño de partícula más grande se ha convertido en un factor limitante para la conversión del plástico, mientras más grande sea el pellet la superficie específica del mismo es más baja (Ügdüler et al., 2020, p.10).

#### 3.3.2. *Hipótesis específicas*

##### 3.3.2.1. *Hipótesis I*

- Por medio de la hidrólisis alcalina del tereftalato de polietileno post- consumo se llegará a recuperar el Ácido tereftálico.

En resumen, después de haber pasado por las etapas de experimentación, estudio, obtención de resultados e interpretación de los mismos, se puede atrever a esclarecer que el tereftalato de polietileno (PET) por medio de la hidrólisis alcalina, se puede descomponer en sus monómeros, siendo el ácido tereftálico el monómero principal. Se considera que este método de reciclaje químico brinda un beneficio tanto socioambiental como un apoyo para futuras investigaciones relacionadas con el amplio campo de despolimerización de los plásticos.

##### 3.3.2.2. *Hipótesis II*

- El mejor rendimiento de la despolimerización del PET post- consumo se obtendrá con el tamaño de partícula mínimo, 5mm.

**Tipo de hipótesis:** estadística

De acuerdo al análisis estadístico realizado, se ha considerado dos hipótesis, la hipótesis planteada en la investigación corresponde a la hipótesis alterna y generando para ello también la hipótesis nula.

$H_N$  = El tamaño de partícula entre 5mm y 10mm no presenta un efecto diferente sobre el % de despolimerización

$H_A$  = El tamaño de partícula entre 5mm y 10mm si presenta un efecto diferente sobre el % de despolimerización

La hipótesis nula hace referencia a que la media de la variable en estudio es la misma de los demás grupos. Por otra parte, en la hipótesis alterna se considera que al menos dos de las medias son diferentes. Con el análisis estadístico ANOVA, se permite comparar múltiples medias por medio del estudio de la varianza (Joaquín, 2016, p.1).

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=2,02759				
Error: 3,4640 gl: 12				
DIÁMETRO Medias n E.E.				
10mm	89,44	8	0,66	A
5mm	95,95	8	0,66	B
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)				

**Figura 18-3.** Test Tukey: Diámetro de partícula

Fuente: Sánchez, M.2021

El resultado del obtenido de “p-valor” fue inferior a 0,0001 para un análisis ANOVA con un  $\alpha = 0,05$ .

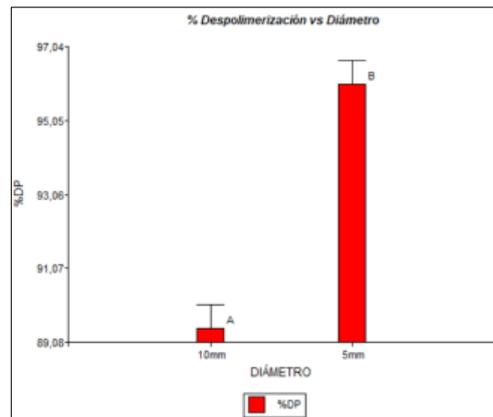
Considerando que:

$$H_N \quad p - valor > 0,05$$

$$H_A \quad p - valor < 0,05$$

$H_N$ = Hipótesis nula

$H_A$ = Hipótesis alterna



**Figura 19-3.** % Despolimerización vs Diámetro

Fuente: Sánchez, M.2021.

Encontrando así que, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna. Es decir, el porcentaje de despolimerización es diferente para cada tamaño de partícula.

### 3.3.2.3. Hipótesis III

- Por medio de la caracterización de la muestra obtenida se establece la veracidad de la despolimerización del PET post-consumo, así como las propiedades y características que presenta el ácido tereftálico

Como se pudo evidenciar en el espectro del ácido tereftálico, existen picos muy similares a los obtenidos por trabajos previos, siendo uno de los picos más característicos los encontrados en las zonas:

- **Zona 2:** con picos representativos de ácidos carboxílicos, comprendidos entre  $2979,8-1282,43 \text{ cm}^{-1}$
- **Zona 4:** sustitución 1-4 del anillo de benceno, picos entre  $1509,03 \text{ cm}^{-1}$  y  $1574,59 \text{ cm}^{-1}$ ,
- **Zona 5:** característico de anillos benceno “para- sustituidos”, con un pico de  $782.958 \text{ cm}^{-1}$

De igual manera, en cuanto a las pruebas de solubilidad y de acuerdo a lo establecido en teoría, el ácido tereftálico es prácticamente insoluble en agua y en especial en disolventes orgánicos. Al someter el producto del reciclaje químico, se ha evidenciado dos fases entre los compontes, confirmando así que la presencia del ácido tereftálico.

## CONCLUSIONES

- Se muestreo y caracterizó el plástico a emplear para la hidrólisis alcalina. Por medio del test clásico de identificación de plásticos y de la espectroscopia FTIR, se determina que indudablemente se trata del PET. En la primera prueba, se descartó la presencia de cualquier otro plástico que no sea del tipo PET, debido a que con la prueba de Beilstein se evidenció una llama naranja y apareció una reacción química con el ácido sulfúrico formando así un precipitado blanco. En cuanto al espectro FTIR, se encuentra el estiramiento carbonilo, vibración de la banda éster y vibración =C-H del anillo de benceno. El pico más característico se encuentra en  $1241,93\text{ cm}^{-1}$ , el cual corresponde al grupo tereftalato.
- Con el plástico verde de 5mm x 5mm se ha obtenido un porcentaje de despolimerización promedio de 95,79% y el rendimiento promedio de 96,345%. Mientras que, con el plástico rosado de 10mm x 10mm se obtuvo el porcentaje más bajo correspondiente a 85,89% y 90,689% correspondientemente. Considerando las condiciones estipuladas, así como los valores obtenidos por la presente investigación se establece que, el tamaño adecuado para el reciclaje químico del PET por medio de la hidrólisis alcalina es de 5mm x 5mm.
- La espectroscopia IR ha presentado picos característicos para el ácido tereftálico, comprendido entre las zonas 2,4 y 5. Con la prueba de solubilidad también se corroboró que el producto obtenido tiene características muy similares al TPA empleado para la síntesis del plástico tipo PET
- El color del plástico también es otro factor determinante para el porcentaje de despolimerización y de rendimiento. Por lo general, las grandes industrias dedicadas a la elaboración de envases plásticos destinados al contacto con alimentos, emplean pigmentos orgánicos y debido al carácter electrofílico que estos presentan, impide que la base pueda actuar directamente con las moléculas del PET; ocasionando consecuentemente un menor porcentaje de despolimerización.

## RECOMENDACIONES

- Limpiar completamente el plástico antes de usarla para el reciclaje químico.
- Realizar la parte experimental con los trozos de plástico completamente secos.
- Para evitar pérdida de masa durante el proceso de hidrólisis, es una excelente idea el cubrir completamente el sistema con una tapa acorde a las medidas del vaso de precipitación, preferentemente que no sea de vidrio.
- No dejar la muestra de ácido tereftálico a la intemperie durante un periodo largo, para ello es mejor directamente guardarlo en algún frasco hermético
- Antes de analizar a muestra de ácido tereftálico es importante moler completamente la muestra

## BIBLIOGRAFÍA

**AL-MALAIKA, S., et al.** Additives for Plastics. *Brydson's Plastics Materials*: Eighth Edition. Octava. 2017. S.l.: s.n., pp. 127-168. ISBN 9780323358248.

**AL-SABAGH, A., et al.** Greener routes for recycling of polyethylene terephthalate. *Egyptian Journal of Petroleum* [en línea].2016,vol. 25, no. 1, pp. 53-64. ISSN 20902468. DOI 10.1016/j.ejpe.2015.03.001. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejpe.2015.03.001>.

**ALAERTS, L., AUGUSTINUS, M. & VAN ACKER, K.** Impact of bio-based plastics on current recycling of plastics. *Sustainability (Switzerland)*.2018,vol. 10, no. 5. ISSN 20711050. DOI 10.3390/su10051487.

**ALMAZÁN, D.** Simulación del proceso de transferencia de calor para el moldeo de preformas de PET Universidad Autónoma Del Estado De México. [en línea]. Toluca: Universidad Autónoma del Estado de México. 2019. [Consulta: 16 enero 2021]. Disponible en: <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/104832>.

**BAUR, E., et al.** *Additives, Fillers, and Fibers*. Plastics Handbook.2019,pp. 579-624. DOI 10.3139/9781569905609.006.

**BECK, K.** ¿Qué es la prueba Tukey HSD?. [en línea]. 2018. [Consulta: 24 enero 2021]. Disponible en: <https://sciencing.com/what-is-the-tukey-hsd-test-12751748.html>.

**BHOGLE, C. & PANDIT, A.** Ultrasound-Assisted Alkaline Hydrolysis of Waste Poly(Ethylene Terephthalate) in Aqueous and Non-aqueous Media at Low Temperature. *Indian Chemical Engineer*.2018,vol. 60, no. 2, pp. 122-140. ISSN 00194506. DOI 10.1080/00194506.2017.1310634.

**BRITANNICA, T.** Solubility | chemistry |. [en línea]. 2018. [Consulta: 12 enero 2021]. Disponible en: <https://www.britannica.com/science/solubility-chemistry>.

**BROOKS, C.** ¿Qué es el análisis estadístico? . [en línea]. 2020. [Consulta: 24 enero 2021]. Disponible en: <https://www.businessnewsdaily.com/6000-statistical-analysis.html>.

**BUI, N., SATOMI, T. & TAKAHASHI, H.** *Recycling woven plastic sack waste and PET bottle*

*waste as fiber in recycled aggregate concrete: An experimental study*. Waste Management [en línea].2018,vol. 78, pp. 79-93. ISSN 18792456. DOI 10.1016/j.wasman.2018.05.035. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.05.035>.

**CĂȚA, A., et al.** Alkaline Hydrolysis of Polyethylene Terephthalate Under Microwave Irradiation. *Rev. Roum. Chim* [en línea].2017,vol. 62, no. 7, pp. 531-538. Disponible en: <http://web.icf.ro/rrch/>.

**CHIRAYIL, C., MISHRA, R. & THOMAS, S.** Materials Recovery, Direct Reuse and Incineration of PET Bottles. En: *Sabu THOMAS, A. VASUDEO RANE, et al. (eds.), Recycling of Polyethylene Terephthalate Bottles* [en línea]. Andrew,Wil. 2018. Kalara: Elsevier Inc., pp. 37-60. ISBN 9780128113615. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-811361-5.00003-1>.

**CHIRAYIL, T. & REDISKE, J.** Impact of pigments on the dimensional stability of plastics. Annual Technical Conference - ANTEC, Conference Proceedings.2016,pp. 295-304.

**CHRISTIE, R.** Colour Chemistry. Glossary for the Worldwide Transportation of Dangerous Goods and Hazardous Materials [en línea]. second. 2015. Edimburgo: s.n., pp. 63-64. ISBN 9781849733281. Disponible en: <https://www.daryatamin.com/wp-content/uploads/2019/12/Colour-Chemistry.pdf>.

**CLARIANT.** The coloration of plastic and rubber. [en línea].2019,Disponible en: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwj\\_sPL53L3qAhVCqaQKHTXACgEQFjAAegQIBRAB&url=https%3A%2F%2Fwww.clariant.com%2F-%2Fmedia%2FFiles%2FBusiness-Units%2FPigments%2FPlastics%2FProduct-Ranges-Tables-Sites%2FClariant-Brochur](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwj_sPL53L3qAhVCqaQKHTXACgEQFjAAegQIBRAB&url=https%3A%2F%2Fwww.clariant.com%2F-%2Fmedia%2FFiles%2FBusiness-Units%2FPigments%2FPlastics%2FProduct-Ranges-Tables-Sites%2FClariant-Brochur).

**COMBALE, F.** Producción de ácido tereftálico a partir de P-XILENO. [en línea]. Córdoba: 2020. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.12272/4511>.

**CORNEJO, P.** Los ácidos carboxílicos. [en línea]. 2017. [Consulta: 27 enero 2021]. Disponible en: <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/prepa3/n8/m9.html>.

**CRAWFORD, R. & MARTIN, P.** General properties of plastics. *Plastics Engineering* [en línea]. cuarta. 2020. S.l.: s.n., pp. 1-57. ISBN 9780081007099. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/book/9780081007099/plastics-engineering>.

**CRUZ, B., BLANCO, R. & GUERRA, B.** 2019. Aspectos básicos para el desarrollo de formulaciones elastoméricas. Santa Clara: Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.

**DAI, S., et al.** *Direct Synthesis of Polar Functionalized Polyethylene Thermoplastic Elastomer.* *Macromolecules.*2020,vol. 53, no. 7, pp. 2539-2546. ISSN 15205835. DOI 10.1021/acs.macromol.0c00083.

**DEL PUERTO, E., et al.** *Adsorption study and detection of the high performance organic pigments quinacridone and 2,9-dimethylquinacridone on Ag nanoparticles by surface-enhanced optical spectroscopy.* *Langmuir.*2014,vol. 30, no. 3, pp. 753-761. ISSN 07437463. DOI 10.1021/la403625u.

**DOS SANTOS, A., et al.** Processing and characterization of PET composites reinforced with geopolymer concrete waste. *Materials Research.*2017,vol. 20, pp. 411-420. ISSN 15161439. DOI 10.1590/1980-5373-MR-2017-0734.

**DOS SANTOS, C., et al.** Processo de reciclagem química de PET em meio alcalino: efeito da concentração do íon hidróxido, da cor do PET e do tempo de reação. *Matéria (Rio de Janeiro).*2018,vol. 23, no. 4. DOI 10.1590/s1517-707620180004.0566.

**DUNST, S., et al.** Comparison of the solution and vacuum-processed quinacridones in homojunction photovoltaics. *Monatshefte fur Chemie.*2017,vol. 148, no. 5, pp. 863-870. ISSN 00269247. DOI 10.1007/s00706-017-1971-3.

**EDMONDSON, S. & GILBERT, M.** *The Chemical Nature of Plastics Polymerization. Brydson's Plastics Materials: Eighth Edition.* Octava. 2017. S.l.: s.n., pp. 19-37. ISBN 9780323358248.

**HAN, M.** Depolymerization of PET Bottle via Methanolysis and Hydrolysis. En: S. THOMAS, A. VASUDEO RANE, et al. (eds.), *Recycling of Polyethylene Terephthalate Bottles* [en línea]. Andrew,Wil. 2019. Dahejon: Elsevier Inc., pp. 85-108. ISBN 9780128113615. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-811361-5.00005-5>.

**HASSANPOUR, M. & UNNISA, S.A.** *Plastics; Applications, Materials, Processing and Techniques.* *Plastic Surgery and Modern Techniques.*2017,vol. 2, no. 1. DOI 10.29011/2577-1701.100009.

**HURIHURI, T.A.** *Plastics in the Environment*. Royal Society Te Apārangi [en línea]. New Zealand: 2019. Disponible en: <https://issuu.com/royalsocietynz/docs/plastics-in-the-environment/1?ff>.

**IMPACT PLASTICS**. Understanding Your Data Sheet: Density & Specific Gravity. [en línea]. 2018. [Consulta: 9 enero 2021]. Disponible en: <https://blog.impactplastics.co/blog/understanding-your-data-sheet-density-and-specific-gravity>.

**JOAQUÍN, R.** ANOVA análisis de varianza para comparar múltiples medias. [en línea]. 2016. [Consulta: 22 febrero 2021]. Disponible en: [https://www.cienciadedatos.net/documentos/19\\_anova](https://www.cienciadedatos.net/documentos/19_anova).

**JUNG, M., et al.** Validation of ATR FT-IR to identify polymers of plastic marine debris, including those ingested by marine organisms. *Marine Pollution Bulletin* [en línea]. 2018, vol. 127, no. December 2017, pp. 704-716. ISSN 18793363. DOI 10.1016/j.marpolbul.2017.12.061. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.12.061>.

**KANDASAMY, S., et al.** *Study of alkaline hydrolysis of post consumed polyethylene terephthalate waste*. AIP Conference Proceedings. 2020, vol. 2240, no. May. ISSN 15517616. DOI 10.1063/5.0011020.

**LANGER, E., et al.** *Methods of PET Recycling*. S.l.: s.n. 2020. ISBN 9780323462006.

**LÓPEZ, P. & FACHELLI, S.** Metodología de la Investigación Social Cuantitativa. *Revista de Educación y Derecho*. 2018, no. 17. ISSN 23864885. DOI 10.1344/reyd2018.17.13.

**MACAS, J.** Análisis estructural de un compuesto orgánico para su identificación . [en línea]. Machala : 2017. [Consulta: 9 enero 2021]. Disponible en: [http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/11437/1/MACAS\\_VÉLEZ\\_JONATHAN\\_FRANCO.pdf](http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/11437/1/MACAS_VÉLEZ_JONATHAN_FRANCO.pdf).

**MANDAL, S. & DEY, A.** PET Chemistry. En: S. THOMAS, A. VASUDEO RANE, et al. (eds.), *Recycling of Polyethylene Terephthalate Bottles* [en línea]. Andrew, Wil. 2019. S.l.: s.n., pp. 1-22. ISBN 9780128113615. Disponible en: <https://www.elsevier.com/books/recycling-of-polyethylene-terephthalate-bottles/thomas/978-0-12-811361-5>.

**MATUSZEK, K., et al.** Studies on the solubility of terephthalic acid in ionic liquids. *Molecules*.2020,vol. 25, no. 1, pp. 1-10. ISSN 14203049. DOI 10.3390/molecules25010080.

**MÉNDEZ, A.** Rutas opcionales para el reciclado de materiales plásticos . *Plastics Technology México [en línea]*. 2017. [Consulta: 4 febrero 2021]. Disponible en: <https://www.pt-mexico.com/articulos/rutas-opcionales-para-el-reciclado-de-materiales-plsticos>.

**MÉNDEZ, A.** Reciclado químico: una alternativa de valor dentro de la economía circular de los plásticos | *Plastics Technology México*. [en línea]. 2020. [Consulta: 8 diciembre 2020]. Disponible en: <https://www.pt-mexico.com/articulos/reciclado-quimico-una-alternativa-de-valor-dentro-de-la-economia-circular-de-los-plasticos>.

**NARANJO, V.** El Telégrafo - Noticias del Ecuador y del mundo - Lo cotidiano está ligado a los plásticos. [en línea]. 2019. [Consulta: 12 octubre 2020]. Disponible en: <https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/sociedad/6/plasticos-contaminacion-ecuador>.

**PLASTIC EUROPE.** *Plastics-the Facts 2017 An analysis of European plastics production, demand and waste data*. [en línea]. Brussels: 2017. [Consulta: 27 noviembre 2020]. Disponible en: [https://www.plasticseurope.org/application/files/1715/2111/1527/Plastics\\_the\\_facts\\_2017\\_FINAL\\_for\\_website.pdf](https://www.plasticseurope.org/application/files/1715/2111/1527/Plastics_the_facts_2017_FINAL_for_website.pdf).

**PLASTICSEUROPE.** Tipos de plásticos. [en línea]. 2020. [Consulta: 3 enero 2021]. Disponible en: <https://www.plasticseurope.org/es/about-plastics/what-are-plastics/large-family>.

**POLITO, O., CIRIO, S. & SALAS, E.** *Planta industrial de ácido tereftálico*. Universidad Tecnológica Nacional. La Plata: 2016.

**RODRÍGUEZ, F.** The Plastic . [en línea]. 2020. [Consulta: 26 noviembre 2020]. Disponible en: <https://www.britannica.com/science/plastic#ref82461>.

**SAITO, Y., et al.** Dispersion of quinacridone pigments using cellulose nanofibers promoted by CH- $\pi$  interactions and hydrogen bonds. *Cellulose* [en línea].2020,vol. 27, no. 6, pp. 3153-3165. ISSN 1572882X. DOI 10.1007/s10570-020-02987-0. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10570-020-02987-0>.

**SANG, T., et al.** Polyethylene terephthalate degradation under natural and accelerated

weathering conditions. *European Polymer Journal* [en línea].2020,vol. 136, no. June, pp. 109873. ISSN 00143057. DOI 10.1016/j.eurpolymj.2020.109873. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2020.109873>.

**SELKE, S., et al.** *Additives and Compounding*. Plastics Packaging.2016,pp. 159-184. DOI 10.3139/9783446437197.005.

**SILVA, E., et al.** Properties of post-consumer polyethylene terephthalate coating mechanically deposited on mild steels. *Coatings*.2019,vol. 9, no. 1. ISSN 20796412. DOI 10.3390/coatings9010028.

**SINGH, S., et al.** Recycling of Waste Poly(ethylene terephthalate) Bottles by Alkaline Hydrolysis and Recovery of Pure Nanospindle-Shaped Terephthalic Acid. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*.2018,vol. 18, no. 8, pp. 5804-5809. ISSN 1533-4880. DOI 10.1166/jnn.2018.15363.

**SMITHERS.** Densidad | Ensayo de plásticos propiedades físicas . [en línea]. 2021. [Consulta: 9 enero 2021]. Disponible en: <https://www.smithers.com/industries/packaging/manufacturers-and-users/packaging-materials-testing/plastic-testing-physical-properties/density>.

**SOCIEDAD QUÍMICA ESTADOUNIDENSE.** Ftalocianina. [en línea]. 2014. [Consulta: 21 febrero 2021]. Disponible en: <https://www.acs.org/content/acs/en/molecule-of-the-week/archive/p/phthalocyanine.html>.

**SUASNAVAS, M.F.** Caracterización de desechos plásticos generados en la USFQ y Estudio de Factibilidad de la Instalación de una planta de reciclaje para la producción de mesas móviles que se adapten a las salas de cine del Paseo. [en línea].2016,pp. 73. Disponible en: <http://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/6107/1/128779.pdf>.

**TASCON.** Eflorescencia en superficies | tascon.eu. Analytical Services & Consulting [en línea]. 2020. [Consulta: 28 noviembre 2020]. Disponible en: <https://www.tascon.eu/en/blooming-of-plastic-additives.html>.

**TESSNOW-VON WYSOCKI, I. & LE BILLON, P.** *Plastics at sea: Treaty design for a global solution to marine plastic pollution*. *Environmental Science and Policy* [en línea].2019,vol. 100, no. February, pp. 94-104. ISSN 18736416. DOI 10.1016/j.envsci.2019.06.005. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.06.005>.

**ÜGDÜLER, S., et al.** Towards closed-loop recycling of multilayer and coloured PET plastic waste by alkaline hydrolysis. *Green Chemistry*.2020,vol. 22, no. 16, pp. 5376-5394. ISSN 14639270. DOI 10.1039/d0gc00894j.

**UNIDAD DE MATERIALES.** Espectroscopia de infrarrojo. [en línea]. 2019. [Consulta: 10 enero 2021]. Disponible en: <https://www.cicy.mx/unidad-de-materiales/servicio/espectroscopia-de-infrarrojo>.

**VARELA, D. & JORDY, S.** Logística Inversa y medioambiente Sistema de recolección PET. [en línea]. Bogotá: 2018. [Consulta: 12 octubre 2020]. Disponible en: [https://reunir.unir.net/bitstream/handle/123456789/7426/VARELA DONADO%2C JORDY STEVAN.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://reunir.unir.net/bitstream/handle/123456789/7426/VARELA_DONADO%2C_JORDY_STEVAN.pdf?sequence=1&isAllowed=y).

**ZANELA, T., MUNIZ, E. & ALMEIDA, C.** Chemical recycling of poly(Ethylene terephthalate) (PET) by alkaline hydrolysis and catalyzed glycolysis. *Orbital*.2018,vol. 10, no. 3, pp. 226-233. ISSN 19846428. DOI 10.17807/orbital.v10i3.1104.

**ZINA, F., et al.** *Novel Sensitive Impedimetric Microsensor for Phosphate Detection Based on a Novel Copper Phthalocyanine Derivative*. *Analytical Letters* [en línea].2018,vol. 51, no. 3, pp. 371-386. ISSN 1532236X. DOI 10.1080/00032719.2017.1322096. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/00032719.2017.1322096>.

## ANEXOS

### ANEXO A: SELECCIÓN DE MATERIA PRIMA



a)



b)

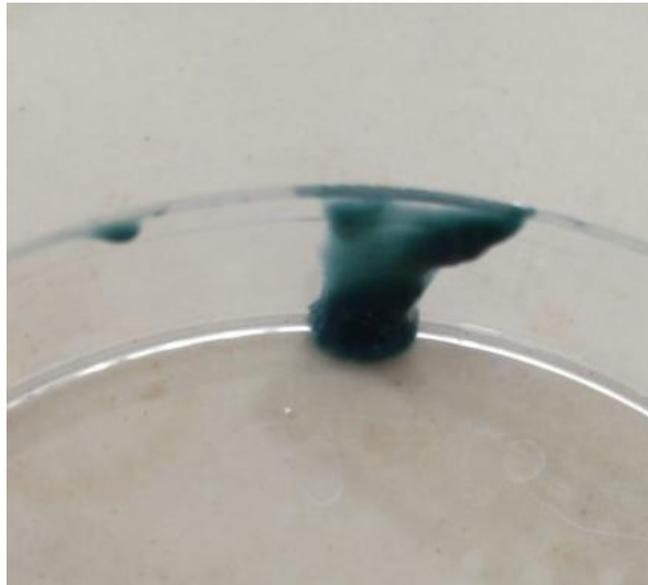
a) Plástico Rosado

b) Plástico verde

**ANEXO B: PIGMENTO A ANALIZAR EN EL FT IR**



a)



b)

a) Pigmento rosado

b) Pigmento verde

## ANEXO C: CARACTERIZACIÓN DEL ÁCIDO TEREFTÁLICO



a)



b)

a) Solventes para la prueba de solubilidad

b) Espectrofotómetro de infrarrojo

## ANEXO D: CÁLCULO PARA EL PORCENTAJE DE DESPOLIMERIZACIÓN Y RENDIMIENTO

### PORCENTAJE DES POLIMERIZACIÓN

#### Datos:

- $M^0_{PET}=5,0521g$
- Masa papel filtro (1) " $M_{pf}$ " = 1,5515g
- Masa papel filtro (1) + PET No degradado " $M_{pf+NPET}$ " = 1,755g

$$M^1_{PET} = M_{pf+NPET} - M_{pf}$$

$$M^1_{PET} = 1,755g - 1,5515g$$

$$M^1_{PET} = 0,2035g$$

$$\%Dp = \frac{M^0_{PET} - M^1_{PET}}{M^0_{PET}} \times 100$$

#### Donde:

- $M^0_{PET}$  es la masa inicial del PET ingresado en el sistema
- $M^1_{PET}$  es la masa de PET que NO ha reaccionado

$$\%Dp = \frac{5,0521g - 0,2035g}{5,0521g} \times 100$$

$$\%Dp = 95,972\%$$

### PORCENTAJE DE RENDIMIENTO

$$5gr PET \times \frac{0,8645 gr \text{ ácido tereftálico}}{1gr PET} = 4,3225g \text{ de ácido tereftálico}$$

#### Datos:

- $M^{teórico}_{TPA} = 4,3225g$

- $M^{exp}_{TPA} = 4,1526 \text{ g}$

$$\%R = \frac{M^{exp}_{TPA}}{M^{teórico}_{TPA}} * 100$$

Donde:

$\%R$  = porcentaje de rendimiento

$M^{exp}_{TPA}$  = Masa final de la fracción sólida (experimental) (g)

$M^{teórico}_{TPA}$  = Masa final de la fracción sólida (teórico) (g)

$$\%R = \frac{4,1526 \text{ g}}{4,3225 \text{ g}} * 100$$

$$\%R = \mathbf{96,069\%}$$

## ANEXO E: PIGMENTOS

PV FAST PIGMENTS																
PRODUCT NAME	COLOUR INDEX															
		PP	PE	PVC	PS /SAN	ABS	PC	POM	PA	PET	PBT	PMMA	Rubber /TPV	SBC	TPO	TPU
PV Fast																
YELLOW H9G	Pigment Yellow 214	■	■	■	■	■	-	■	-	-	●	●	■	■	■	■
YELLOW H4G	Pigment Yellow 151	■	■	■	●	●	-	-	-	●	●	-	■	■	■	■
YELLOW H2G	Pigment Yellow 120	■	■	■	■	■	-	-	-	-	-	●	■	■	■	●
YELLOW HG 01	Pigment Yellow 180	■	■	■	■	■	-	-	-	-	-	■	■	■	■	■
YELLOW HG	Pigment Yellow 180	■	■	■	■	■	-	-	-	-	-	■	■	■	■	■
YELLOW H2GR	Pigment Yellow 191	■	■	■	■	■	■	●	-	-	-	■	■	■	■	■
YELLOW HGR	Pigment Yellow 191	■	■	■	■	■	■	●	-	-	-	■	■	■	■	■
YELLOW HR 02*	Pigment Yellow 83	-	●	■	-	-	-	-	-	-	-	-	■	■	●	●
YELLOW HR *	Pigment Yellow 83	-	●	■	-	-	-	-	-	-	-	-	■	■	●	●
YELLOW H3R	Pigment Yellow 181	■	■	■	■	■	-	■	-	-	-	●	■	■	■	■
ORANGE H4GL 01	Pigment Orange 72	■	■	■	■	■	-	■	-	-	-	●	■	■	■	■
ORANGE H2GL	Pigment Orange 64	■	■	■	■	■	●	●	-	-	●	●	■	■	■	●
ORANGE GRL	Pigment Orange 43	■	■	■	■	■	■	-	●	-	-	●	■	■	■	■
ORANGE 6RL	Pigment Orange 68	■	■	■	■	■	■	■	-	-	-	●	■	■	■	■
SCARLET 4RF	Pigment Red 242	■	■	■	■	■	■	■	-	■	■	■	■	■	■	■
RED HGR 01	Pigment Red 285	■	■	■	■	■	■	-	-	-	-	-	■	■	■	●
RED B	Pigment Red 149	■	■	■	■	■	■	■	●	■	■	■	■	■	■	■
RED D3G	Pigment Red 254	■	■	■	●	●	-	■	-	-	●	-	■	■	■	■
RED HB	Pigment Red 247	■	■	■	■	■	■	-	-	-	■	●	■	■	■	■
RED BNP	Pigment Red 214	■	■	■	■	■	■	■	-	●	■	■	■	■	■	■
RED HF4B	Pigment Red 187	■	■	■	■	■	■	■	-	-	■	■	■	■	■	■
RED E3B	Pigment Violet 19	■	■	■	■	■	■	●	●	●	●	●	■	■	■	■
RED E5B	Pigment Violet 19	■	■	■	■	■	■	●	●	●	●	●	■	■	■	■
PINK E	Pigment Red 122	■	■	■	■	■	■	●	●	●	●	●	■	■	■	■
PINK E 01	Pigment Red 122	■	■	■	■	■	■	●	●	●	●	●	■	■	■	■
VIOLET BLP	Pigment Violet 23	■	■	■	■	-	-	-	●	-	-	-	■	■	■	●
VIOLET RL	Pigment Violet 23	■	■	■	■	●	-	-	●	-	-	-	■	■	■	●
BLUE A4R	Pigment Blue 15:1	■	■	■	■	■	●	●	●	●	●	■	■	■	■	■
VIOLET BLP	Pigment Violet 23	■	■	■	■	-	-	-	●	-	-	-	■	■	■	●
VIOLET RL	Pigment Violet 23	■	■	■	■	●	-	-	●	-	-	-	■	■	■	●
BLUE A4R	Pigment Blue 15:1	■	■	■	■	■	●	●	●	●	●	■	■	■	■	■
BLUE A2R	Pigment Blue 15:1	■	■	■	■	■	●	●	●	●	●	■	■	■	■	■
BLUE BG	Pigment Blue 15:3	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
BLUE B2G	Pigment Blue 15:3	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
GREEN GNX	Pigment Green 7	■	■	■	■	■	■	■	●	●	■	■	■	■	■	■
BROWN HFR	Pigment Brown 25	■	■	■	-	-	-	■	-	-	-	●	■	●	■	■
BROWN RL	Pigment Brown 41	■	■	■	■	-	-	■	-	-	-	●	■	●	■	■

a)

a) Pigmentos empleados acorde al tipo de plástico

Fuente: Clariant, 2019.



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS DEL APRENDIZAJE  
UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y DOCUMENTAL**

**REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA**

**Fecha de entrega:** 18 / 10 / 2021

<b>INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)</b>
<b>Nombres – Apellidos:</b> <i>Mishell Carolina Sánchez Rojas</i>
<b>INFORMACIÓN INSTITUCIONAL</b>
<b>Facultad:</b> <i>Ciencias</i>
<b>Carrera:</b> <i>Ingeniería Química</i>
<b>Título a optar:</b> <i>Ingeniera Química</i>
<b>f. Analista de Biblioteca responsable:</b> <i>Lic. Luis Caminos Vargas Mgs.</i>

LUIS  
ALBERTO  
CAMINOS  
VARGAS

Firmado digitalmente por LUIS  
ALBERTO CAMINOS VARGAS  
Nombre de reconocimiento  
(DN): cn=EC, ln=BIORAMBA,  
serialNumber=0502766974,  
cn=LUIS ALBERTO CAMINOS  
VARGAS  
Fecha: 2021.10.18 09:43:25  
-05'00'



0774-DBRAI-UPT-2021