



**Descripción de los procesos existentes de la degradación de polímeros más utilizados, como también la biomasa disponible en el Ecuador**

Mármol Carlosama, Julissa Marcela

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Petroquímica

Trabajo de Unidad de Integración Curricular, previo a la obtención del título de Petroquímica

Ing. Sayavedra Delgado, Jonathan Javier. Msc

15 de agosto de 2022

Latacunga

## Reporte de verificación de contenido



Trabajo de UIC Marmol.docx  
Scanned on: 2:23 August 11, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

Identical Words	321
Words with Minor Changes	12
Paraphrased Words	0
Omitted Words	3215



JONATHAN JAVIER  
SAYAVEDRA DELGADO

Ing. Sayavedra Delgado, Jonathan Javier



## Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

### Carrera de Petroquímica

#### Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular: **“Descripción de los procesos existentes de la degradación de polímeros más utilizados, como también la biomasa disponible en el Ecuador”** fue realizado por la señorita **Mármol Carlosama, Julissa Marcela**, el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizada en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Latacunga, 15 de agosto de 2022



Firmado electrónicamente por:  
JONATHAN JAVIER  
SAYAVEDRA DELGADO

.....  
Ing. Sayavedra Delgado, Jonathan Javier

C.C.: 0502865850



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Petroquímica

Responsabilidad de autoría

Yo, **Mármol Carlosama, Julissa Marcela**, con cédula de ciudadanía n° 1004788798, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular: **Descripción de los procesos existentes de la degradación de polímeros más utilizados, como también la biomasa disponible en el Ecuador** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 15 de agosto de 2022

**Mármol Carlosama, Julissa Marcela**

C.C.: 1004788798



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Petroquímica

**Autorización de publicación**

Yo **Mármol Carlosama, Julissa Marcela**, con cédula de ciudadanía n° 1004788798, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: "Descripción de los procesos existentes de la degradación de polímeros más utilizados, como también la biomasa disponible en el Ecuador" en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Latacunga, 15 de agosto de 2022

**Mármol Carlosama, Julissa Marcela**

C.C.: 1004788798

### **Dedicatoria**

A Dios, por cuidarme y guiarme durante mi vida universitaria.

A mis padres, Guillermo y Marcelina con mucho amor y de corazón; por su esfuerzo, trabajo y sacrificio, los cuales me han enseñado la responsabilidad y el valor de las cosas, de que nada es fácil, pero con esfuerzo y dedicación todo es posible...

A mis hermanos, por su apoyo incondicional y motivacional durante el transcurso de mi carrera.

## **Agradecimientos**

A mis padres, por ser guías y ejemplo de superación, gracias por el apoyo económico, material y moral que me han brindado.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, institución que me ha formado profesionalmente durante varios años, a los docentes quienes supieron ser guía y sabiduría durante el transcurso de la carrera y un especial agradecimiento al Ing. Javier Sayavedra, quien supo orientarme en el desarrollo del presente trabajo.

A mis hermanos y familia en general por el aliento y confianza que me han dado.

A mis amigos, compañeros y conocidos, en especial a Belén y Paty por su apoyo, compañía y cariño, de todos los momentos compartidos, las experiencias y emociones vividas durante mi vida universitaria.

A Marlon por su apoyo y compañía incondicional.

A todas las personas que hicieron posible que este sueño se convierta en realidad y por darme la confianza necesaria para seguir adelante y saber que todo se puede lograr.

**ÍNDICE DE CONTENIDO**

<b>Carátula .....</b>	<b>1</b>
<b>Reporte de verificación de contenido.....</b>	<b>2</b>
<b>Certificación .....</b>	<b>3</b>
<b>Responsabilidad de autoría .....</b>	<b>5</b>
<b>Autorización de publicación .....</b>	<b>6</b>
<b>Dedicatoria .....</b>	<b>6</b>
<b>Agradecimientos.....</b>	<b>7</b>
<b>Índice de contenido .....</b>	<b>8</b>
<b>Índice de figuras .....</b>	<b>14</b>
<b>Índice de tablas .....</b>	<b>15</b>
<b>Resumen.....</b>	<b>16</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>17</b>
<b>Capítulo I: Introducción.....</b>	<b>18</b>
<b>Antecedentes .....</b>	<b>18</b>
<b>Planteamiento del problema .....</b>	<b>20</b>
<b>Justificación e importancia.....</b>	<b>21</b>
<b>Objetivos .....</b>	<b>22</b>
<b><i>Objetivo general</i>.....</b>	<b>22</b>
<b><i>Objetivos específicos</i> .....</b>	<b>22</b>
<b>Hipótesis.....</b>	<b>22</b>
<b>Variables de investigación .....</b>	<b>23</b>
<b><i>Variable dependiente</i>.....</b>	<b>23</b>



<b>Variable independiente</b> .....	23
<b>Capítulo II: Marco teórico</b> .....	24
<b>Polímeros</b> .....	24
<b>Clasificación de los polímeros</b> .....	24
<b>Por las propiedades fisicoquímicas</b> .....	24
<b>Por su origen</b> .....	25
<b>Polietileno (PE)</b> .....	26
<b>Definición</b> .....	26
<b>Origen</b> .....	27
<b>Proceso de obtención</b> .....	28
<b>Polimerización a alta presión:</b> .....	28
<b>Proceso de Ziegles-Natta:</b> .....	28
<b>Proceso Philips:</b> .....	28
<b>Principales usos</b> .....	29
<b>Tereftalato de polietileno (PET)</b> .....	29
<b>Definición</b> .....	29
<b>Origen</b> .....	30
<b>Materia Prima</b> .....	30
<b>Proceso de obtención</b> .....	31
<b>Principales usos</b> .....	31
<b>Polipropileno (PP)</b> .....	32
<b>Definición</b> .....	32
<b>Origen</b> .....	32

<b>Materia Prima</b> .....	<b>33</b>
<b>Proceso de obtención</b> .....	<b>33</b>
<b>Principales usos</b> .....	<b>34</b>
<b>Policarbonato (PC)</b> .....	<b>34</b>
<b>Definición</b> .....	<b>34</b>
<b>Origen</b> .....	<b>35</b>
<b>Materia Prima</b> .....	<b>35</b>
<b>Principales usos</b> .....	<b>35</b>
<b>Biomasa</b> .....	<b>36</b>
<b>Tipos de materia prima de biomasa</b> .....	<b>37</b>
<b>Componentes de la biomasa</b> .....	<b>39</b>
<b>Celulosa</b> .....	<b>39</b>
<b>Hemicelulosa</b> .....	<b>39</b>
<b>Lignina</b> .....	<b>39</b>
<b>Propiedades de la biomasa</b> .....	<b>39</b>
<b>Contenido de humedad</b> .....	<b>39</b>
<b>Contenido de Materia volátil</b> .....	<b>40</b>
<b>Contenido de cenizas</b> .....	<b>40</b>
<b>Contenido de carbón fijo</b> .....	<b>40</b>
<b>Poder calorífico</b> .....	<b>41</b>
<b>La química verde</b> .....	<b>41</b>
<b>Principios de la química verde</b> .....	<b>42</b>
<b>Biorrefinería</b> .....	<b>45</b>

<b>Procesos de degradación.....</b>	<b>45</b>
<b><i>Pirólisis.....</i></b>	<b>45</b>
<b><i>Copirólisis .....</i></b>	<b>46</b>
<b><i>Gasificación .....</i></b>	<b>46</b>
<b><i>Hidrólisis .....</i></b>	<b>46</b>
<b>Simuladores de procesos químicos .....</b>	<b>46</b>
<b><i>Aspen Plus .....</i></b>	<b>47</b>
<b><i>AVEVA PRO/II.....</i></b>	<b>47</b>
<b><i>CHEMCAD .....</i></b>	<b>47</b>
<b>Capítulo III: Metodología.....</b>	<b>48</b>
<b>Modalidad de la investigación .....</b>	<b>48</b>
<b>Tipo de investigación .....</b>	<b>48</b>
<b><i>Investigación Bibliográfica.....</i></b>	<b>48</b>
<b>Diseño de la investigación .....</b>	<b>49</b>
<b><i>Diseño Documental-Bibliográfico.....</i></b>	<b>49</b>
<b>Nivel de investigación .....</b>	<b>49</b>
<b><i>Nivel exploratorio.....</i></b>	<b>49</b>
<b><i>Nivel Descriptivo.....</i></b>	<b>49</b>
<b>Técnicas e instrumento de recolección de información .....</b>	<b>50</b>
<b><i>Análisis Documental.....</i></b>	<b>50</b>
<b><i>Análisis de Contenido .....</i></b>	<b>50</b>
<b><i>Procesamiento de información.....</i></b>	<b>50</b>
<b><i>Discusión de Resultados.....</i></b>	<b>50</b>

Capítulo IV: Análisis e interpretación de los resultados .....	52
Procesos mayormente utilizados en la degradación de polímeros.....	52
Descripción de los procesos de degradación de los polímeros. ....	55
Polímeros que importa el Ecuador .....	58
<i>Polietileno</i> .....	59
<i>Polipropileno</i> .....	60
<i>Policarbonato</i> .....	61
<i>Tereftalato de Tereftalato de Polietileno</i> .....	62
Disponibilidad de biomasa en el Ecuador.....	63
<i>Comparación de caracterización de la biomasa</i> .....	66
<i>Comparación de análisis proximal de cada tipo de biomasa</i> .....	67
Palma Africana .....	67
Banano .....	67
Arroz .....	68
Cacao .....	69
Caña de Azúcar .....	70
Procesos que permiten aprovechar la disposición final de residuos plásticos.....	71
<i>Copirólisis del PE</i> .....	71
<i>Copirólisis del PP</i> .....	72
<i>Copirólisis del PC</i> .....	73
<i>Copirólisis del PET</i> .....	73
Capítulo V: Conclusiones y recomendaciones.....	76
Conclusiones .....	76

<b>Recomendaciones .....</b>	<b>78</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>79</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>91</b>

**ÍNDICE DE FIGURAS**

<b>Figura 1</b> <i>Estructura molecular polietileno</i> .....	27
<b>Figura 2</b> <i>Estructura molecular tereftalato de polietileno</i> .....	30
<b>Figura 3</b> <i>Estructura molecular polipropileno</i> .....	32
<b>Figura 4</b> <i>Estructura molecular policarbonato</i> .....	34
<b>Figura 5</b> <i>Instalaciones industriales de degradación de los plásticos</i> .....	54
<b>Figura 6</b> <i>Importaciones de los principales polímeros utilizados en el Ecuador</i> .....	59
<b>Figura 7</b> <i>Comparación de importaciones del PE al Ecuador</i> .....	60
<b>Figura 8</b> <i>Comparación de importaciones del PP al Ecuador</i> .....	61
<b>Figura 9</b> <i>Comparación de importaciones del PC al Ecuador</i> .....	62
<b>Figura 10</b> <i>Comparación de importaciones del PET al Ecuador</i> .....	63

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b>	<i>Polímeros sintéticos y los microorganismos que los degradan</i> .....	26
<b>Tabla 2</b>	<i>Análisis aproximado de los principales componentes de la biomasa</i> .....	36
<b>Tabla 3</b>	<i>Tipos de materias primas de biomasa utilizadas para generar energía</i> .....	37
<b>Tabla 4</b>	<i>Doce principios de la química verde con su respectiva descripción</i> .....	42
<b>Tabla 5</b>	<i>Tratamiento de residuos plásticos sólidos</i> .....	52
<b>Tabla 6</b>	<i>Descripción de los procesos de degradación de los polímeros</i> .....	55
<b>Tabla 7</b>	<i>Disponibilidad de biomasa en el Ecuador</i> .....	63
<b>Tabla 8</b>	<i>Comparación de producción de productos que aportan a la biomasa</i> .....	64
<b>Tabla 9</b>	<i>Disponibilidad de biomasa por provincias del Ecuador</i> .....	65
<b>Tabla 10</b>	<i>Comparación de propiedades de los tipos de biomasa</i> .....	66
<b>Tabla 11</b>	<i>Comparación de análisis proximal de estudios de la palma africana</i> .....	67
<b>Tabla 12</b>	<i>Comparación de análisis proximal de estudios del banano</i> .....	68
<b>Tabla 13</b>	<i>Comparación de análisis proximal de estudios del arroz</i> .....	68
<b>Tabla 14</b>	<i>Comparación de análisis proximal de estudios del cacao</i> .....	69
<b>Tabla 15</b>	<i>Comparación de análisis proximal de estudios de la caña de azúcar</i> .....	70
<b>Tabla 16</b>	<i>Comparación de productos de estudios de copirólisis del PE</i> .....	71
<b>Tabla 17</b>	<i>Comparación de productos de estudios de copirólisis del PP</i> .....	72
<b>Tabla 18</b>	<i>Productos de un estudio de copirólisis del PC</i> .....	73
<b>Tabla 19</b>	<i>Comparación de productos de estudios de copirólisis del PET</i> .....	74

## Resumen

Se llevó a cabo una revisión bibliográfica acerca de los procesos de degradación de los polímeros, donde se encuentra la pirólisis, gasificación e hidrólisis, como también la biomasa disponible en el Ecuador, con el propósito de encontrar una alternativa para producir elementos de mayor valor agregado, a fin de disminuir la cantidad de plásticos en el país y que cumplan con los principios de la química verde. En Ecuador los principales polímeros que se importa son el: polietileno, polipropileno, policarbonato y tereftalato de polietileno, generando una gran cantidad de residuos plásticos por lo que se desea minimizar este contaminante por tratamientos que produzcan diversos productos. Además, en el país los productos que mayor aportan en la generación de la biomasa son los residuos de palma africana, arroz, banano, cacao y caña de azúcar; mismos que pueden ser aprovechados para la generación de energía por medio de tratamientos termoquímicos. Los resultados recogidos en cuanto a las importaciones de los polímeros se tiene el polietileno es el polímero más utilizado en el país al realizar la comparación para tres años, en cuanto a la biomasa se ha recopilado información de la caracterización de cada residuo que aporta de manera significativa la biomasa, asimismo la comparación de diferentes estudios de análisis proximal. Finalmente, se ha determinado que la copirólisis es un proceso que permite tratar a los polímeros y a la biomasa de forma conjunta y generar combustibles líquidos y gaseosos, que vienen hacer los productos de mayor demanda comercial en el Ecuador. Por esta razón, se ha comparado varias investigaciones de copirólisis, que se ha observado y analizado que productos se obtiene.

*Palabras clave:* Biomasa, polímeros, proceso de degradación, copirólisis



### **Abstract**

A bibliographic review was carried out about the polymer degradation processes, where pyrolysis, gasification and hydrolysis are found, as well as the biomass available in Ecuador. This with the purpose of finding an alternative to produce elements with higher added value and reduce the amount of plastics in the country so that they comply with the principles of green chemistry. In Ecuador the main polymers that are imported are polyethylene, polypropylene, polycarbonate, and polyethylene terephthalate, generating a large amount of plastic waste, so it is desired to minimize this pollutant by treatments that produce various products. In addition, in our country the products that contribute the most in the generation of biomass are the residues of African palm, rice, banana, cocoa and sugar cane; same that can be used for the generation of energy through thermochemical treatments. The results collected in terms of imports of polymers show that polyethylene is the most used polymer in the country when making the comparison for three years. Regarding biomass, information has been compiled on the characterization of each residue that contributes significantly to biomass, as well as the comparison of different proximal analysis studies. Finally, it has been determined that co-pyrolysis is a process that allows polymers and biomass to be treated together and, therefore, to generate liquid and gaseous fuels, which are the products with the highest commercial demand in Ecuador. For this reason, several co-pyrolysis investigations have been compared and the products obtained have been observed and analyzed. to be able to analyze what products are obtained.

*Key words:* biomass, polymers, degradation process, co-pyrolysis

## Capítulo I

### Introducción

#### Antecedentes

La producción y consumo mundial anual de los polímeros se encuentra sobre los 330 millones de toneladas, y de esta cantidad tan solo el 5% es producida en América Latina, debido a la gran demanda utilitaria en diferentes sectores industriales, comerciales y domésticos, sin embargo, estos polímeros cuentan con una inadecuada disposición final que contribuyen a la contaminación ambiental (Peña et al., 2018; Williams, 2021).

Es así que, la alta acumulación de residuos plásticos requiere de una atención especial, para que estos puedan recibir un tratamiento correcto, de acuerdo a la investigación de Filatov et al., (2018) señala que cerca de 8 millones de toneladas anuales de residuos plásticos son depositados en los océanos, que amenazan la vida acuática y afirma que si no hay un cambio hoy, se tiende que para el año 2050 se tendrá más plástico que peces, por lo que se debe buscar procesos que permitan disminuir la cantidad de polímeros de un solo uso.

Es necesario saber que los residuos poliméricos se pueden degradar por procesos fisicoquímicos o por medio de microorganismos. Siguiendo una serie de cuatro pasos que son la fotodegradación, la hidrólisis, la degradación termooxidativa y finalmente la biodegradación, estos mecanismos ocurren cuando los residuos se encuentran en el medio ambiente, pero este proceso toma mucho tiempo, por lo que puede ser llevado a cabo en más de 50 años para degradar por completo al plástico (Ali et al., 2021).

Por tal circunstancia, existen varios procesos de disposición final de residuos plásticos, que los tradicionales y más usados son el depósito en vertederos o rellenos sanitarios con el 50% y la incineración con el 19%, el 22% evade la gestión de residuos;

también se tiene por medio de técnicas de reciclaje que representa el 9%, y de esto se tiene que en Europa el reciclaje mecánico representa el 99% y reciclaje termoquímico el 1% restante dentro de este se tiene a la pirólisis y/o reformado catalítico con vapor, gasificación; que son mecanismos que tratan a los residuos en menor tiempo, unos son amigables con el medio ambiente y otros no, por lo que es imprescindible analizar cuál posee más beneficios (OECD, 2022; Williams, 2021).

En el escenario actual de la contaminación ambiental es un tema muy preocupante, parte de esta, es ocasionada por la mala disposición de los residuos poliméricos que presentan sustancias químicas peligrosas para el ambiente, que en su mayor parte afecta al agua y al suelo. Por otro lado, hoy por hoy la química verde es el tópico del futuro, porque se centra en tratar de suprimir y disminuir las sustancias que afectan al medio ambiente a partir de su producción hasta su disposición final, es así como este tema se relaciona con otras ciencias tales como la ambiental, ecología y toxicología (Okunola A et al., 2019; Pino & Ocampo, 2020).

En cuanto a la biomasa a nivel mundial es abundante, en su mayor parte provienen de actividades agrícolas, forestales, ganaderas, también intervienen aguas residuales y cultivos de tipo acuático y en pequeña medida residuos sólidos urbanos que no presenten un uso posterior (Tursi, 2019).

Actualmente, las principales aplicaciones de la biomasa son en la fabricación de pisos, seguidos los alimentos y por último para la generación de energía, siendo este la utilización de mayor interés, sin embargo, hasta el momento la biomasa solo ha logrado cubrir el 13% de la demanda de consumo energético mundial, mientras que el 77% restante aún sigue producido por fuente de recursos fósiles. Estos recursos generan cerca de 10 000 millones de toneladas anuales de carbono fósil, en comparación a la biomasa, que produce tan solo 7 000 millones de toneladas de biocarbono (Popp et al., 2021).

## Planteamiento del problema

Hoy en día los procesos de disposición final de los polímeros son negativos y entre ellos se tiene los residuos plásticos en los rellenos sanitarios, en los vertederos de ríos y océanos, o por incineración, es decir, existe una falta de control en cuanto a la deposición de los residuos, que ocasionan problemas en la flora y fauna del ambiente (Huerta, 2019).

Los residuos plásticos que mayormente se generan son el polietileno de alta y baja densidad, polipropileno, poliestireno, cloruro de polivinilo y el tereftalato de polietileno, estos residuos son desechados de una manera incorrecta afectando al medio ambiente, por tal razón es necesario conocer procedimientos que contrarresten esta problemática, uno de ellos es la pirólisis el cual permite obtener productos útiles y de mayor valor agregado tales como gas de síntesis, aceite y parafinas; mismas que se obtiene por medio de la fragmentación de los polímeros iniciales (Williams, 2021).

Portilla-Jiménez, (2022) en su investigación, señala que Ecuador es un país que consume y produce una alta cantidad de plásticos de un solo uso, y por ende se genera gran cantidad de residuos plásticos; se estima que en Ecuador se produce alrededor de 1500 millones de fundas y que tan solo la mitad de estas se reciclan, por otro lado, se tiene la importación de 373 776 toneladas de productos elaborados a base de plásticos, siendo estas cifras muy significativas que requieren atención.

Ecuador no cuenta con procesos eficientes y amigables con el medio ambiente para la disposición final de los polímeros que se comercializan y se utilizan, por lo que las técnicas de disposición son los depósitos en vertederos y la incineración. En este sentido, es necesario conocer qué procesos aportan de manera positiva en la degradación de los polímeros en el Ecuador.

Asimismo, hoy en día Ecuador cuenta con gran cantidad de biomasa que no es aprovechada de manera eficiente.

## **Justificación e importancia**

Es necesario la correcta gestión de los residuos plásticos, por tal motivo dentro de los procesos de disposición final de los residuos plásticos se tiene a la pirólisis catalítica como el principal proceso que permite la reutilización de los polímeros que apoyan a la química verde, es decir que permiten obtener una degradación y reutilización, que contribuye a la minimización de la contaminación ambiental.

De modo que se tiene que tratar de cumplir con los principios de la química verde los cuales se enfocan en los ciclos de vida que cumple un producto, que parte desde su materia prima hasta su disposición final, de este modo se habla del primer principio, para prevenir la generación de residuos y así evitar tratarlo después, pero se sabe que esto es imposible, por tanto, es imprescindible la aplicación de un flujo circular del producto, para que los residuos generados de este se los transforme en productos útiles y se aproveche de manera eficiente (Abdussalam-Mohammeda et al., 2020).

Otro principio es el siete, que hace referencia al empleo de materias primas provenientes de fuentes renovables, para así ejecutar la producción de los bioplásticos, que son la tendencia actual como alternativa de los plásticos; con este principio es posible el aprovechamiento de la biomasa que se dispone en el país, para la fabricación de este producto que se degrada con mayor facilidad (Abdussalam-Mohammeda et al., 2020).

Para reemplazar el uso de recursos fósiles, es importante disponer con una cantidad de biomasa que genere un alto contenido de biocarbono, y de esta manera se pueda cubrir con la demanda energética y coadyuvar al ambiente.

Es necesario aprovechar toda la biomasa que se encuentra disponible en el Ecuador. De acuerdo con el trabajo realizado por Posso et al., (2020) indica que la cantidad de biomasa disponible en el Ecuador es de alrededor de 19 258 952 toneladas por año, esto agrupa a residuos agrícolas, ganaderos y forestales. Esta biomasa puede ser empleada para la producción de hidrógeno y de energía, para minimizar los gastos en importaciones.

Por tal motivo, en este trabajo se propone la investigación acerca de la biomasa que posee el Ecuador de tipo bibliográfica. Con el fin de recolectar toda la información posible en un solo documento.

## **Objetivos**

### ***Objetivo general***

Describir los procesos existentes de la degradación de polímeros más utilizados, como también la biomasa disponible en el Ecuador.

### ***Objetivos específicos***

Realizar una revisión bibliográfica de los procesos más utilizados de degradación de los residuos plásticos, enfocados en la química verde.

Investigar los polímeros más utilizados en el Ecuador, para ver las cantidades de residuos plásticos que se generan.

Identificar la disponibilidad de biomasa dentro del país y efectuar una investigación sobre análisis proximales realizados a los residuos seleccionados, para una comparación de estos.

Definir un proceso óptimo de tratamiento de los residuos poliméricos junto a la biomasa disponible en el país, para la producción de productos de valor agregado, enfocados a la química verde.

## **Hipótesis**

¿Es posible aplicar una alternativa para la producción de elementos con valor agregado a partir de los residuos plásticos, a fin de disminuir la cantidad de plásticos en el país?

**Variables de investigación*****Variable dependiente***

Tipo de procesos de disposición final de los polímeros.

***Variable independiente***

Tipos de polímeros y biomasa

## Capítulo II

### Marco teórico

#### Polímeros

El término polímero fue introducida en 1832 por parte del químico J. J. Berzelius, que hacía referencia a cualquier compuesto con un peso molecular que fuera un múltiplo del peso molecular de otro compuesto con la misma composición elemental, esto fue introducido tras observar los resultados del experimento del fraccionamiento de un líquido realizado por Faraday en 1826, por tanto, se suponía que la composición elemental definía un compuesto, pero eso cambio hasta que se dieron cuenta que el estireno no era un polímero de acetileno, por lo que existió confusiones, y aparecieron nuevas teorías, hasta que encontraron que el producto de policondensación depende de su composición elemental de los monómeros de partida (Morawetz, 2014).

Los polímeros son moléculas de alto peso molecular, que presentan grandes aplicaciones en diferentes sectores por su bajo costo de adquisición y las propiedades que este posee en cuanto a alta resistencia, viscosidad y elasticidad, estos materiales se encuentran conformados por la unión de pequeñas unidades químicas llamadas monómeros por medio de reacciones químicas de polimerización. Estas cadenas de los polímeros pueden ser lineales o ramificadas (Kumar & Gupta, 2018).

#### ***Clasificación de los polímeros***

##### **Por las propiedades fisicoquímicas**

***Polímeros termoplásticos:*** Son los polímeros que una vez que han alcanzado la temperatura de transición vítrea, se funden, ablanda y adquieren un estado líquido viscoso, para un posterior moldeado y tener como resultados sólidos semicristalinos después del enfriamiento. Es importante mencionar que el comportamiento de fusión y solidificación de



estos materiales son limitados, porque al estar en calentamiento y enfriamiento por varias veces, este puede tener efectos secundarios como cambios de estructura o funcionales. Tienen las ventajas de que son dúctiles y de fácil reciclaje (Bîrca et al., 2019).

**Polímeros termoestables:** Son los polímeros que una vez que han llegado a la temperatura de fusión, estos se solidifican de manera irreversible, es decir no son blandos, y no pueden volverse a fundir, debido a que pueden descomponerse químicamente o carbonizarse. Estos polímeros presentan redes complejas interconectadas entre sí, que producen un producto sólido, duro y rígido de forma permanente. Son resistentes a la tracción y compresión. Son resistentes a disolventes, a la tracción y compresión (Bîrca et al., 2019).

#### **Por su origen**

**Polímeros naturales:** Los polímeros naturales son aquellos que provienen directamente del reino animal y/o vegetal y se los puede obtener a través de técnicas físicas o químicas. Se puede decir que existen seis tipos generales de polímeros naturales y estos son: lignina, polisacáridos, polinucleótidos, poliisoprenos, poliésteres y proteínas, que son utilizados en su mayoría en la industria alimenticia, de textiles, de adhesivos y farmacia (Y. Chen, 2019; Liu et al., 2018).

**Polímeros sintéticos:** Los polímeros sintéticos son productos que han sido desarrollados por el ser humano, se originan por reacciones de polimerización de varios monómeros, estas reacciones pueden presentarse de dos tipos, que son reacciones en cadena o reacción por pasos. Estos en su mayor parte provienen de fuentes no renovables como los combustibles fósiles, en la Tabla 1, se presentan varios polímeros y con qué microorganismos se pueden degradar (Feldman & Barbalata, 1996; Muneer et al., 2020).

**Tabla 1**

*Polímeros sintéticos y los microorganismos que los degradan*

<b>Tipo de enlace</b>	<b>Especies</b>	<b>Composición principal</b>	<b>Microorganismos de degradación</b>
Polímero de enlace C-C	Polietileno	Etileno	Bacterias, hongos, consorcios del suelo
	Polipropileno	Propileno	Bacterias, consorcios del suelo
	Poliestireno	Etilbenceno	Bacterias
	Cloruro de polivinilo	Cloruro de vinilo	Bacterias, hongos, consorcios marinos
Polímero de enlace hidrolizable	Poliuretano	Poliol e isocianato	Bacterias, hongos, consorcios del suelo
	Tereftalato de polietileno	Etileno y tereftalato	Bacterias, consorcios microbianos

*Nota.* Tomada de (Enzymatic degradation of plant biomass and synthetic polymers).

## **Polietileno (PE)**

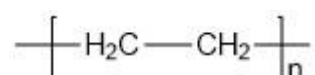
### **Definición**

El polietileno es el polímero que presenta la estructura más simple de los polímeros  $(CH_2)_n$ , este polímero es un polímero de etileno se lo produce por el método de polimerización por adición. El PE es el polímero que mayormente se produce, debido a las

ventajas que este posee como lo son los costos bajos de procesamiento, son buenos aislantes eléctricos con gran gama de frecuencias, tienen alta resistencia química, dureza, flexibilidad y transparencia en películas finas de varios grados. En la Figura 1 se muestra la estructura molecular del polietileno (Ronca, 2017).

### Figura 1

*Estructura molecular polietileno*



### Origen

Como la mayoría de los compuestos químicos, el PE se produjo de manera accidental en 1894 por Hans von Peckmann, donde la descomposición del diazometano produjo un polvo blanco, que posteriormente se lo analizó y se obtuvo como resultado largas secuencias de grupos metileno, por lo que le llamaron polimetileno. En 1933, dos investigadores de Chemical Industries (ICI) Eric Fawcett y Reginald Gibson realizaban un estudio de una mezcla de etileno y benzaldehído a altas temperatura y pudieron observar caídas de presión en el recipiente, por lo que pensaron que era una fuga del reactor, pero al abrir observaron un sólido ceroso de color blanco, que era el polietileno. Es así como se produjo la polimerización del etileno por radicales libres ocasionado por la presencia de oxígeno (Demirors, 2011).

Este proceso se hizo público 3 años más tarde por Fawcett, que pasó a ser patentada por parte de Chemical Industries (ICI) en el año de 1937 y se la empezó a utilizar comercialmente hasta los años 50, porque aparecieron nuevos procesos que empleaban catalizadores, gracias a estos se pudo obtener polímeros a temperaturas y presiones más bajas y con una estructura modificada. Sin embargo, esto modificaba la densidad del polímero por lo que surgieron los polietilenos de baja densidad (LDPE) y polietileno de alta densidad (HDPE) (Ronca, 2017).

### **Proceso de obtención**

Existen varias maneras para preparar el polietileno, algunas de ellas se describen a continuación:

**Polimerización a alta presión:** La polimerización del etileno ocurre por medio de una polimerización por adición, de manera comercial se desarrolla a elevadas presiones que están en un rango de 100 a 300 MPa, a temperaturas de 80-300 °C. El proceso consiste en emplear un iniciador de radicales libres que por lo general es oxígeno, para que intuya al etileno en radicalizarse y pueda formar el polímero, esta reacción es altamente exotérmica. La conversión del monómero de etileno en PE es del 10 al 30% (Ronca, 2017).

**Proceso de Ziegles-Natta:** Este proceso consiste en formar un complejo de coordinación entre el catalizador y el monómero en el momento de la polimerización, para que el monómero se encuentre controlado en el instante que se acerque a la cadena polimérica. Las condiciones de reacción se pueden dar por debajo de los 100 °C, que usualmente son los 70 °C, en ausencia de oxígeno y agua. En este proceso el polietileno se forma por precipitación de la solución, mientras que el catalizador queda suspendido en esta solución, como producto se obtiene un polímero de mayor densidad (Ronca, 2017).

**Proceso Philips:** Este proceso consiste en disolver al etileno en un hidrocarburo líquido, por ejemplo, el ciclohexano, en este caso ocurre la polimerización con la presencia de un catalizador de óxido metálico soportado que casi siempre es el  $\text{CrO}_3/\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ , a una temperatura de 130-160 °C y presiones de 1.4-3.5 Mpa. El disolvente sirve para disolver al polímero mientras este se va formando, además sirve como medio de transferencia de calor, es decir el disolvente no interviene en la reacción. Posterior a la polimerización se somete la mezcla a una separación de gas líquido, que por acción de enfriamiento el polímero va a precipitar y separarse por completo del disolvente. También se obtiene polímeros con mayor densidad (Ronca, 2017).

### ***Principales usos***

El PE es ampliamente utilizado en productos que los usamos o estamos en contacto con ellos como filmes que permiten cubrir alimentos para que no se descompongan en menor tiempo y a su vez para evitar la contaminación de los alimentos por bacterias, en los aislantes de cables eléctricos, como tuberías para transporte de gas natural. En la fabricación de juguetes, en la agricultura específicamente en los invernaderos, en ensilaje, como películas. En empaquetamiento con el objetivo de mejorar el transporte, almacenamiento de ciertos productos. Además, se lo utiliza como láminas protectoras de humedad en cartones de leche, jugos y otros líquidos.

El PE presenta una gran resistencia a ácidos, bases y ambientes corrosivos, por tal motivo se lo emplea como limpiadores domésticos, detergentes, aceite de motor, almacenamiento de gasolina, entre otras. Por otro lado, el PE es el polímero número uno de adquisición, por sus costos que son accesible, su fácil procesamiento y por las propiedades físicas, químicas y mecánicas que tiene (Demirors, 2011).

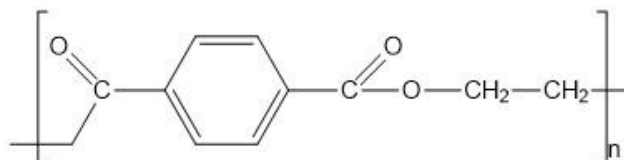
### **Tereftalato de polietileno (PET)**

#### ***Definición***

El tereftalato de polietileno es una resina copolimérica, este se encuentra formado por un monómero llamado tereftalato de bis(2-hidroxietilo). Este polímero es termoplástico y semiaromático pertenece a la familia de los poliésteres, tiene propiedades como una baja densidad, baja permeabilidad a los gases, alta resistencia y durabilidad física y química, el PET es ampliamente empleado en la fabricación de botellas, láminas y fibras. En la Figura 2 se observa la estructura molecular del PET (Danso et al., 2019; Koshti et al., 2018).

## Figura 2

*Estructura molecular tereftalato de polietileno*



## Origen

El PET al igual que otros compuestos surgieron de manera accidental o por prueba y error, es así como los químicos británicos Whinfield y Dickson en 1941 descubrieron y lo sintetizaron por primera vez en los laboratorios de la Calico Printers Association, se patentó por parte de la empresa Dupont y se lo ha registrado con el nombre comercial de Dacron. También en ese mismo año se sintetizó el terileno que vendría a ser el primer producto poliéster para la base de fibras sintéticas por la empresa Imperial Chemical Industries (East, 2009; Xin et al., 2021).

## Materia Prima

Los compuestos que permiten formar el PET son el etilenglicol (EG) y el ácido tereftálico purificado (PTA), o el dimetil tereftalato (DMT). EL proceso general consta de dos pasos el primero consiste en formar un prepolímero, que es el tereftalato de bis-hidroxietilo (bis-HET), que luego este se polimeriza y produce el tereftalato de polietileno polimérico. El DMT hasta la década de los 60 ha sido escogido como materia prima favorita para fabricar el PET, pero con el trascurso del tiempo esto ha cambiado y el PTA es el escogido actualmente por la ventaja que produce una rápida esterificación del prepolímero, pero sus elevados costos lo impiden que lo seleccionen (Li-Na, 2013).

### ***Proceso de obtención***

Esta parte de la preparación de la materia prima, seguido de esterificación o transesterificación, la pre-policondensación y la policondensación.

Esta parte de realizar una mezcla entre el EG y el catalizador que por lo general es el acetato de zinc, después ingresan a un reactor en el que ocurre el intercambio de ésteres con el DMT o el PTA. En el caso que se emplea DMT, se separa metanol por encima de la corriente de reflujo en una columna de destilación. Si se emplea PTA se libera agua como subproducto, se separa por encima. Este proceso es mejor porque no debe haber instalaciones de recuperación de reactivos. La corriente de fondo va a contener al prepolímero y mezcla de DMT/EG, se sigue a una filtración y finalmente ingresa a los reactores de policondensación. El sobrante de EG es retirado por la parte superior y se recircula al mezclador, a medida que la polimerización ocurre a presión reducida. Las condiciones de reacción de polimerización son las siguientes, cuando se emplea el DMT se trabaja con una presión de 100 kPa y la temperatura en un rango de 160 a 220 °C. En el caso de operar con PTA se tiene una presión de 300 a 500 kPa y una temperatura de 240 a 260 °C. Al obtener el prepolímero bis-HET, se lo hace reaccionar y produce oligómeros y se policondensan y forman finalmente el PET (Koshti et al., 2018).

### ***Principales usos***

En cuanto a las aplicaciones del PET, es posible decir que más del 60% de la producción de este polímero se lo utiliza en la fabricación de fibras sintéticas, como lo es el poliéster que representa el 18% de la producción mundial del total de polímeros, que es ampliamente utilizado a su vez en confección de ropa, en cordón de neumáticos, para rellenos de cojines, tejidos sintéticos, entre otros.

En la fabricación de botellas con un 30%, que se lo utiliza en el agua embotellada, por sus propiedades físicas y su inercia química, hace que se aplique en el envasado de alimentos líquidos; tales como bebidas, aderezos, zumos, además estas botellas son

ligeras, resistentes y de fácil reciclaje; y el 10% restante es de uso industrial para la fabricación de películas de PET que son polímeros termoplásticos y que se los puede fundir varias veces, es así que las películas de poliéster son necesarias en diferentes sectores como en la electrónica, electricidad, para que sirvan de cajas de instrumentos y máscaras de aire caliente (Li-Na, 2013).

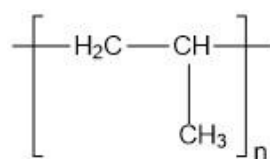
## **Polipropileno (PP)**

### ***Definición***

El polipropileno es un homopolímero que se forma por la polimerización por adición del monómero de propileno. El PP posee buenas propiedades mecánicas, como son elevada resistencia a altas temperaturas, dureza y alto punto de fusión. Este tipo de polímero se lo utiliza en la fabricación de botellas, bandejas, embudos y frascos de utensilios que deben ser esterilizados en el ambiente clínico. En la Figura 3 se muestra la estructura molecular del PP (Calhoun, 2010; Hisham A. Maddah, 2016).

### **Figura 3**

#### *Estructura molecular polipropileno*



### ***Origen***

El PP se descubrió en 1954 por Natta, a través del empleo de un catalizador de Ziegler en la reacción de polimerización del propileno y que permitió obtener como producto al PP altamente isotáctico, al obtener como resultados este producto además proporciona un rendimiento económico y grandes propiedades para la fabricación de termoplásticos comerciales en menor tiempo. Sin embargo, este proceso se patentó en 1957 por



Montecani en Italia y Hércules en Estados Unidos, que produjeron PP cristalino de manera comercial (Lieberman, 2000).

### ***Materia Prima***

Para la producción del PP se parte del monómero de propeno que este frecuentemente se produce por craqueo al vapor de nafta o gasóleo a una temperatura que oscila entre los 700 a 950 °C, esto ocasiona una relación de peso entre el etileno y el propeno de 2:1, lo que no es favorable económicamente, por tal motivo el proceso de mayor interés comercial es la deshidrogenación del propano que permite generar altas tasas de producción del monómero (Gahleitner & Paulik, 2017).

### ***Proceso de obtención***

La producción del PP por este proceso usa catalizadores de  $TiCl_3$  activados por  $Al(C_2H_5)_2Cl$  en un hidrocarburo, que por lo común es hexano o queroseno, dado que en esta sustancia el PP isotáctico se encuentra en suspensión. Posterior esta solución ingresa a una serie de reactores con agitación continua. El monómero ingresa de igual manera en el inicio de la secuencia de reactores, y que se va consumiendo de manera continua sin necesidad de recicular al reactivo. Las condiciones de operación de este proceso de polimerización van de los 55 a 70 °C y presiones máximas de 0.5 Mpa.

Posterior a la polimerización se tiene como resultado una pasta que se la pone en contacto con alcohol isopropílico y después con sosa caustica, que permite descomponer y neutralizar los residuos del catalizador, seguido se separa la fase acuosa del polímero. Para finalizar el polímero isotáctico es separado del diluyente que presenta al polímero atáctico, que este a la vez se separa a través de filtración continua o por centrifugación y luego se lo seca en un evaporador de película fina y se lo comercializa como subproducto al atáctico.

Existen otros procesos de polimerización como es el caso del Montedison que trabaja a presiones de 1.3 MPa, en donde se tiene una alimentación extra de hidrógeno en la sección

de reactores para que se alcance el peso molecular del PP, en este proceso si existe una recirculación del monómero, lo que implica un costo adicional (Lieberman, 2000).

### **Principales usos**

Es ampliamente utilizado en la fabricación de fibras y tejidos, por su resistencia química y resistencia a manchas. En cuanto a fibras se puede fabricar fibras cortadas, telas no tejidas y monofilamentos, se aplica como producto final en alfombras, bolsas de fertilizantes, lonas. Fabricación de filmes para cubrir alimentos y ropa. Al ser un termoplástico este puede ser moldeado por soplado, que permite fabricar botellas de agua, botellas de champú y envases de lubricantes y plaguicidas. Asimismo, es indispensable en los automóviles, porque se los usa en la fabricación de cajas de baterías y de conductos CA, molduras interiores, tales como puertas, pilares, consolas, en si se aplica aquí porque permite disminuir el peso (Hisham A. Maddah, 2016).

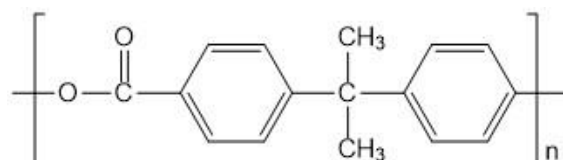
### **Policarbonato (PC)**

#### **Definición**

El policarbonato es un polímero de tipo termoplástico, presenta grandes propiedades físicas químicas y mecánicas como lo son la alta rigidez, resistencia de impacto y térmica, cristalinidad. El PC se forma a partir del bisfenol A y el fosgeno. El PC es utilizado en la fabricación de materiales ligeros como lo son las espumas de alto rendimiento y de baja densidad con estructuras geométricas múltiples. En la Figura 4 se presenta la estructura molecular el PC (Artham & Doble, 2008; Sánchez-Calderón et al., 2021).

#### **Figura 4**

*Estructura molecular policarbonato*



## ***Origen***

El PC Einhorn preparó por primera vez en 1890 por la reacción de hidroquinona con fosgeno en el que se emplea a la piridina como disolvente, pero con esto se produce un polímero frágil, es así que Bischoff unos años más tarde usa los mismos materiales, pero añadió al carbonato de difenilo a cambio del disolvente anteriormente mencionado. Seguirían con los estudios hasta obtener polímeros de mayor resistencia, hasta que en 1941 Pittsburgh Plate Glass Company (PPG) desarrolló una resina llamada CR-39, que vendría a ser un PC termoestable, que se produce a partir de alcohol alílico y biscloroformato de dietilenglicol, este producto tuvo mayor aceptación comercial, por las propiedades que presenta y es considerado como el primer PC disponible al mercado.

## ***Materia Prima***

El PC se lo produce a gran escala por medio de la reacción entre el fosgeno y el bisfenol A. Donde el fosgeno se produce a través de la reacción del cloro, que este a la vez se obtiene de la electrólisis del cloruro de sodio con el monóxido de carbono que se origina de la pirólisis del carbón, el petróleo y/o del gas. Por otro lado, el bisfenol A se obtiene del gas natural, el cual se introduce a craqueo para producir cumeno, que este luego produce fenol y acetona y finalmente se obtiene el bisfenol A (Brunelle, 2006).

## ***Principales usos***

Dentro de las principales aplicaciones del PC se tienen como condensadores de elevada estabilidad, material dieléctrico, material de construcción, almacenamiento de datos, en la automoción, aeronaves, componentes de seguridad, cristales antibalas, protectores de pantallas, ventanas antibalas de un automóvil, entre otros. Estas aplicaciones se las puede realizar debido a que el PC tiene grandes propiedades físicas como es la resistencia al calor y al impacto. De igual modo se lo puede utilizar en la manufactura de faros de automóviles, pero de manera limitada.

También es utilizado como materia prima de otros polímeros o se los mezcla para mejorar sus propiedades físicas como el PVC que presenta mayor aplicabilidad. En la síntesis de resinas que son de dos tipos: los alifáticos de cadena recta y los aromáticos. Un ejemplo de polímero aromático es el poli (bisfenol A carbonato) que tiene gran aplicabilidad industrial, este puede ser usado para fabricar dispositivos de almacenamiento de datos, en ventanas de autos a prueba de balas, envases duraderos para alimentos, en botellas de líquidos, entre otros (Kausar, 2018).

## Biomasa

La biomasa se produce por procesos naturales y antropogénicos, además es un tipo de energía renovable que hoy se ha intensificado su utilización para sustituir a la energía proveniente de combustibles fósiles; la biomasa se produce a partir de residuos orgánicos sólidos, tales como residuos forestales, marinos, ganaderos y de agricultura, que hoy en día también aportan en la contaminación ambiental, porque ciertos de ellos se los deposita en vertederos. En la tabla 2 se presenta un análisis aproximado de los componentes de la biomasa (Tursi, 2019; Vassilev et al., 2010).

**Tabla 2**

*Análisis aproximado de los principales componentes de la biomasa*

Componente	Cantidad (%peso)						Ceniza	Materia volátil	Carbón fijo
	C	H	N	S	O				
Celulosa	42,1	5,8	0,3	0.1	51,7	0	93,6	6,4	
Hemicelulosa	41,9	5,2	0,3	0	51,1	1,5	76,7	21,8	
Lignina	62,3	4,7	0,5	2	28,1	2,4	47,2	50,4	

*Nota.* Tomada de (Prediction of Hydrothermal Carbonization with Respect to the Biomass Components and Severity Factor).

### ***Tipos de materia prima de biomasa***

En la tabla 3. Se presentan los tipos de materias primas que pueden ser usados como biomasa para generar energía.

**Tabla 3**

*Tipos de materias primas de biomasa utilizadas para generar energía*

<b>Fuente</b>	<b>Tipo</b>	<b>Ejemplo</b>
Residuos agrícolas	Residuos agrícolas lignocelulósicos secos	Residuos de maíz, cereales, arroz, hojas de remolacha  Flujos de residuos de viveros
	Residuos ganaderos	Estiércol sólido y líquido de pollo, ganado vacuno, porcino y ovino
Cultivos energéticos especiales	Cultivos energéticos leñosos secos	SRW-sauce, SRC-álamo, eucalipto
	Cultivos energéticos herbáceos secos	Miscanthus, switch Grass, cañaveral, arbustos de la India
	Cultivos energéticos lignocelulósicos	
	Cultivos energéticos oleaginosos	Remolacha azucarera, de caña, sorgo dulce, alcachofa, mijo
	Cultivos energéticos de almidón	Trigo, papas, maíz, cebada, amaranto
	Otros	Lino, cáñamo, tallos de tabaco y algodón, plantas acuáticas,

<b>Fuente</b>	<b>Tipo</b>	<b>Ejemplo</b>
Forestales	Subproductos forestales	Corteza, bloques y astillas de madera, troncos de entresaca.
Industriales	Residuos de la industria de la madera	Residuos industriales de aserraderos y residuos industriales de fábrica de madera como astillas, serrín y, tablas.  Residuos vegetales fibrosos de la producción de pasta virgen y de la producción de papel a partir de la pasta.
	Residuos de la industria alimentaria	Material celulósico húmedo, grasas, sebo, grasa amarilla, proteínas
	Productos industriales	Pellets de serrín y virutas: bio-aceite, etanol, biodiesel
Parques y jardines	Herbácea	Hierba
	Leñosa	Poda
Residuos	Residuos contaminados	Madera de demolición, biodegradables, residuos municipales, lodos de depuradora, gas de vertedero y de depuradora
Otros	Heno de carreteras	Hierba/ heno
	Cáscaras/cascarilla	Almendra, oliva, nuez, hueso de palma, cacao

*Nota.* Tomada de (A review on biomass classification and composition, co-firing issues and pretreatment methods).

### ***Componentes de la biomasa***

**Celulosa:** La celulosa es la molécula principal de las plantas, es el biopolímero de unidades repetitivas de glucosa que existe en mayor cantidad en la naturaleza. En sí es un polímero que proviene de la glucosa. Este biopolímero se lo pueden encontrar en diferentes productos como la madera, el algodón y el cañamo, además puede producirse de las algas, bacterias, hongos y protozoos. En cuanto a la composición química de la celulosa se tiene que son los responsables de la tendencia que esta presenta para generar agregados cristalinos. (Kargarzadeh et al., 2018; Wertz et al., 2010).

**Hemicelulosa:** La hemicelulosa es el segundo polisacárido más abundante en la naturaleza, está compuesta por pentosas, hexosas y ácidos de azúcar. La hemicelulosa se la pueden encontrar en las paredes de las células de las plantas principalmente en la madera, además representa el 20 al 35 % de biomasa lignocelulósica, y la composición de esta puede variar por la dureza o blandesa de la madera. Asimismo, estas componen un tercio de la biomasa de las células conformada por los heteromananos, el xiloglucano, los heteroxilanos y el glucano de enlace mixto (Pauly et al., 2013; Saha, 2003).

**Lignina:** La lignina es un polímero con una estructura compleja, que se forma por el acoplamiento y cruce de los radicales fenólicos que forman el polímero racémico complejo, a este tipo de polimerización se le llama lignificación. Es así que la lignina representa un grupo de polímeros aromáticos que son el resultado del acoplamiento con el 4-hidroxifenilpropanoides. Estos polímeros se los encuentra en las paredes de las células secundarias engrosadas, que aportan con rigidez y hace que la planta sea impermeable (Ralph et al., 2019; Vanholme et al., 2010).

### ***Propiedades de la biomasa***

**Contenido de humedad:** El contenido de humedad aquí se le conoce como la cantidad de agua que desprende la biomasa al ser calentada. En el estudio ámbito, se estudia la humedad extrínseca, debido a que se encuentra influenciada por las condiciones

meteorológicas y más no la intrínseca. Las condiciones climáticas intervienen desde la cosecha de la biomasa, estas pueden verse afectadas por las variaciones del clima. Se tiene dos tipos de tecnología de conversión de biomasa y estas son la bioconversión que emplea biomasa con alto contenido de humedad, y la conversión térmica debajo del 50% peso del contenido de humedad. Además, se estima que la biomasa de fuentes leñosas y herbáceas con bajo contenido de humedad son las más eficientes para la conversión térmica en combustibles líquidos (McKendry, 2002).

**Contenido de Materia volátil:** El contenido de materia volátil se le conoce a la parte de materia que se desprende en forma de gas, en el que se incluye la humedad, esta se libera cuando se calienta a una temperatura de 950 °C en un tiempo de 7 minutos. La medición de este parámetro es importante, debido a que proporciona una medida de la facilidad con la que la biomasa puede encenderse y luego gasificarse u oxidarse (McKendry, 2002).

**Contenido de cenizas:** El contenido de ceniza se lo conoce a los residuos sólido que se originan en la descomposición química de un combustible que proviene de la biomasa, que se lo ha sometido a procesos termoquímicos o bioquímicos. Es necesario mencionar que el contenido de ceniza de la biomasa afecta de manera directa a los costos de manipulación como también a los procesos de conversión.

Por otro lado, se tiene que el contenido de ceniza en un proceso de conversión termoquímica, la composición química puede producir ciertos problemas de funcionamiento del equipo, especialmente en la combustión, esta puede reaccionar y formar escorias, produciendo como resultado una minimización de la planta y el incremento de los costos de operación (McKendry, 2002).

**Contenido de carbón fijo:** El contenido de carbón fijo se lo reconoce como la masa que queda después del desprendimiento de materia volátil, restando el contenido de cenizas y de humedad. Al igual que la masa volátil, la medición de este parámetro también



es importante para la medición de la facilidad de encendido de la biomasa, que depende de en qué se va a utilizar la energía generada por la biomasa (McKendry, 2002).

**Poder calorífico:** El poder calorífico se lo conoce al contenido de energía que se desprende al quemarse la biomasa en el aire. Se mide en unidades de mega Julio (MJ) por unidad de masa de la biomasa utilizada. Por lo general se mide el poder calorífico superior, que viene a ser el contenido total de energía que se emite cuando el combustible se quema en el aire, de este modo representa la cantidad máxima de energía potencialmente recuperable de un tipo de biomasa usada. Este valor puede variar dependiendo de la tecnología que se esté empleando en la conversión. Cabe mencionar que el valor del poder calorífico puede minimizarse cuando hay presencia de humedad (McKendry, 2002).

### **La química verde**

La química verde es una ciencia actual que se enfoca en planificar una síntesis química y diseño molecular de un producto deseado que no afecten a la salud humana y al medio ambiente; a través de la eliminación o minimización de materiales y procesos peligrosos. En otras palabras, la química verde hace referencia a la inclusión de la química orgánica, el análisis químico y físico, la toxicología, microbiología y biotecnología, con el fin de evitar la contaminación que ocasiona un proceso químico determinado (Abdussalam-Mohammeda et al., 2020; Soltys et al., 2021).

La aplicación de la química verde proporciona como resultado una sustancia o técnica más segura y eficiente, a través de la selección de materias primas y diseños de procesos, que por lo general ponen a un lado a las sustancias nocivas, peligrosas y/o tóxicas, por lo que se proyectan a un futuro de procesos industriales que no contaminen el medio ambiente y responsabilicen a los fabricantes de artículos (Abdussalam-Mohammeda et al., 2020; Soltys et al., 2021).

### **Principios de la química verde**

Estos principios fueron propuestos en 1998 por parte de Paul Anastas y John Warner en su libro titulado “*Green Chemistry: Theory and Practice*”, mismo que se encuentra conformado de doce principios y se encuentra dirigido a científicos, industriales y funcionarios gubernamentales, para que apliquen en sus actividades con el fin de reducir o mitigar por completo el uso de materiales y procesos químicos peligrosos al momento de fabricar un producto. Es así como hoy en día estos principios tienen una gran relevancia. A continuación, en la Tabla 4, se presentan los doce principios, con sus descripciones (Soltys et al., 2021).

**Tabla 4**

*Doce principios de la química verde con su respectiva descripción*

<b>Principio</b>	<b>Descripción</b>
Prevención (reducción) de residuos/ subproductos	Este principio consiste en prevenir la generación de los residuos al momento de producir un producto, para evitar su eliminación posterior, dado que estos procesos conllevan a un gasto adicional y que cada vez van aumentando de manera significativa el costo total de producción.
Inclusión máxima de reactivos (materiales de origen) en el producto final	Hace referencia a maximizar la utilización de las materias primas, es decir aprovecharlas al máximo. Esta se mide como la relación del peso molecular del producto deseado sobre los pesos moleculares de los reactivos que participan en la reacción.
Prevención o minimización de productos nocivos	Consiste en sustituir a productos químicos nocivos por enzimas biológicas, que cumplan la misma función al momento de generar un producto deseado, y que no se vea afectado sus propiedades.

<b>Principio</b>	<b>Descripción</b>
Selección del disolvente adecuado	Se relaciona con la utilización de solvente que sean respetuoso con el medio ambientes, es decir que no sean tóxicos, inflamables y/o corrosivos. Además, se establece que se recomienda emplear disolventes más seguros y si es posible evitar el uso de sustancias químicas auxiliares. Estos disolventes deben cumplir con seguridad de proceso, de trabajadores, del medioambiente y la sostenibilidad.
Diseñar productos químicos más seguros	Consiste en producir productos con menor grado de toxicidad, pero que mantengan su misma función y eficiencia. En otras palabras, se espera tener un balance entre el rendimiento óptimo y la función del producto químico, y que indiquen que la toxicidad ha disminuido lo más bajo posible.
Requisitos de energía para la síntesis química	En este caso se desea diseñar reacciones químicas que no impliquen el uso intensivo de energía, por lo que el agotamiento de materias primas cada vez va incrementando, y se tiende a optar por buscar energías renovables, y que no se agoten a largo plazo, para que sigan las futuras generaciones.
Selección de materiales de origen adecuados	Minimizar o en lo posible evitar la generación de productos derivados que son innecesarios, que generan a pasos adicionales para su eliminación de productos indeseados o generan residuos que no son beneficiosos.
El uso de catalizadores	Se centra en utilizar catalizadores biodegradables, para evitar tener un consumo alto de energía. Por lo que se proyecta a la aplicación de biocatalizadores, como es el caso de enzimas

---

<b>Principio</b>	<b>Descripción</b>
	<p>purificadas como las transformaciones realizadas por organismos vivos modificados. Asimismo, las enzimas han demostrado una mayor estereoquímica y selectividad química. Estos catalizadores deben desempeñar gran selectividad y mejorar el rendimiento de producción y en ciertos casos efectuar reacciones que aún no se han desarrollado.</p>
Biodegradación de productos obtenidos	<p>Diseñar productos que estén en la capacidad de degradarse sin ocasionar problemas al medio ambiente. El objetivo es evitar la formación de sustancias nocivas y devolver a producción la mayor cantidad posible de residuos, lo que se consigue mediante el uso del reciclaje. La integración de grupos funcionales como los ésteres o las amidas, que son reconocidos por las enzimas ubicuas puede ayudar al diseño de productos degradables en el medio ambiente</p>
Fortalecimiento de los métodos analíticos para el control de compuestos nocivos	<p>Tiene un enfoque al empleo y a la aplicación de procedimiento analíticos que generen menor cantidad de residuos posibles, con el fin de beneficiar el ambiente y la salud humana. Es por ello por lo que en este principio se desea medir las sustancias químicas sin producir residuos, o problemas como toxicidad.</p>
Desarrollo de unidades de producción, con prevención de accidentes	<p>Es necesario que la selección de una o varias sustancias que se utilicen en un proceso químico sean las correcta, adecuadas y no perjudiciales, o a su vez buscar sustancias que sean sustitutos, para tratar de evitar provocar todo tipo de accidentes químicos, ya sean emisiones, explosiones e incendios que afectan a las personas y al ambiente.</p>

---

<b>Principio</b>	<b>Descripción</b>
Transición de materias primas renovables	Optar por el uso de materias primas renovables como los carbohidratos y triglicéridos, siempre y cuando sea económico y técnicamente aceptable, para que sustituyan a productos provenientes de recursos no renovables como los combustibles fósiles, que afectan al medio ambiente. En sí lo que se desea es producir productos verdes.

*Nota.* Reproducida de (Green Chemistry: Principles, Applications, and Disadvantages), (Green Synthesis of Metal and Metal Oxide Nanoparticles: Principles of Green Chemistry and Raw Materials).

### **Biorrefinería**

La biorrefinería como concepto aparición en 1990 debido a la escasez de combustibles fósiles de ese entonces y por el incremento de tendencia de usar la biomasa como materia prima renovable que por lo general son residuos y subproductos agrícolas, para la fabricación de productos no comestibles, que son amigables con el medio ambiente. Es así que una biorrefinería se la puede definir como una instalación o planta en la que intervienen procesos y equipos que permiten convertir la biomasa en una serie de productos valiosos, tales como biocombustibles, bioenergía y productos bioquímicos; mismos que pueden sustituir a productos derivados del petróleo y gas (Maity, 2015).

### **Procesos de degradación**

#### ***Pirólisis***

La pirólisis es una técnica de descomposición de materia orgánica que es sometida a un calentamiento en ausencia de oxígeno atmosférico y en diferentes rangos de temperatura que permite el fraccionamiento de las moléculas más grandes que se encuentran presentes en la biomasa. En este proceso los productos que se pueden obtener

son el carbón, aceite y gas. Hasta el momento se han desarrollado tres formas de pirólisis y estas son: pirólisis lenta, pirólisis rápida y pirólisis ultrarrápida, estas dependen de las condiciones de operación del proceso (Uddin et al., 2018).

### ***Copirólisis***

La copirólisis es un proceso en el que participan dos o más materiales de diferentes fuentes como materia prima. Esta técnica tiene una proyección industrial a futuro debido a su buena relación entre el rendimiento y costo de operación. Este método permite producir una mezcla homogénea y estable de aceites. Además, esta técnica ayuda a minimizar el volumen de residuos de gran magnitud, dado que aquí se emplea residuos como materia prima (Abnisa & Wan Daud, 2014).

### ***Gasificación***

La gasificación consiste en la conversión térmica de cualquier materia prima orgánica en gases combustibles con un poder calorífico químico valioso, esto se logra tras añadir cantidades estequiométricas de oxígeno en comparación con la cantidad requerida para la combustión del dióxido de carbono y el agua. Esta técnica también puede efectuarse en ausencia de oxígeno, como la pirólisis (Bain & Broer, 2011; Higman, 2008).

### ***Hidrólisis***

La hidrólisis es un proceso que conlleva una reacción de un producto químico orgánico con el agua, en el que ocurre un fraccionamiento de los enlaces químicos por la adición del agua, del que se obtiene como producto dos o más sustancias nuevas. Además, a este método se le conoce como el reverso de una reacción de condensación, dado que en la hidrólisis añado agua y en la condensación produce agua (Speight, 2017).

### **Simuladores de procesos químicos**

Un simulador de procesos químicos es un software que permite realizar el diseño y el modelo del comportamiento de un proceso químico que se encuentra en estado

estacionario, a través de la determinación de las presiones, temperaturas y flujos que intervienen en el proceso. Hoy en día los simuladores de procesos ya se encuentran con programas informáticos que permiten realizar estimación de costos, optimización de procesos, análisis de sensibilidad, entre otras características más (Chaves et al., 2016).

### ***Aspen Plus***

Aspen Plus es un software de simulación de procesos de la industria química que permite realizar modelado de procesos, estimación de costos, diseño de equipos, manejo de energía y análisis de seguridad, con el objetivo de mejorar el tiempo de comercialización, la eficiencia y el desempeño de la sustentabilidad de un proceso determinado, para así solucionar un problema, con la ayuda de un paquete termodinámico (Aspen Technology Inc, 2022).

### ***AVEVA PRO/II***

AVEVA PRO/II es un simulador que permite optimizar el rendimiento de una planta, a través del mejoramiento del diseño de procesos y de la evaluación de alternativas para obtener una operación más rentable, este se encuentra diseñado para realizar cálculos de balance de materia y calor de varios procesos químicos, a través del empleo de ciertos modelos termodinámicos que ofrece el software (Grupo AVEVA, 2020).

### ***CHEMCAD***

CHEMCAD es un software de simulación que se ha diseñado para satisfacer necesidades de la ingeniería química, es decir el software ayuda a desarrollar modelos de procesos químicos con altos grados de dificultad. Además, CHEMCAD permite mejorar las capacidades de diseño y operación de procesos, análisis y prueba con el propósito de impulsar la productividad industrial (Chemstations, 2020).

## Capítulo III

### Metodología

En el presente trabajo se expone la secuencia de pasos a seguir, para alcanzar y cumplir los objetivos propuestos en la investigación en desarrollo.

#### **Modalidad de la investigación**

La investigación planteada es de carácter específicamente cualitativo, de acuerdo a la descripción, análisis e interpretación de los datos y estudios de diferentes autores se tendrá la facultad de describir los procesos de degradación de los polímeros que existen, enfocados a la química verde, como también la cantidad de biomasa que este país dispone, y así permitirán elegir el mejor proceso de degradación para crear una posible alternativa para la producción de elementos con valor agregado, a fin de disminuir la cantidad de plásticos en el país.

El siguiente estudio se presenta con una investigación cualitativa como ya se mencionó anteriormente, debido a que se presentará una recopilación y descripción de los métodos con enfoque a la química verde de deposición final de los polímeros, como también la disponibilidad de biomasa en el Ecuador, y verificar si existe una alternativa para producir productos de mayor valor agregado.

#### **Tipo de investigación**

##### ***Investigación Bibliográfica***

Este trabajo se muestra como una investigación de tipo bibliográfica en su totalidad, dado que permitirá recolectar la información en cuanto a los procesos más empleados en la degradación de los residuos poliméricos y la biomasa disponible en el Ecuador, con base a investigaciones desarrollada por otros autores; es así como la información recopilada debe ser analizada, organizada y clasificada, para que se pueda tratar de solucionar el problema planteado.



## **Diseño de la investigación**

Para este estudio el diseño de investigación conforme el origen de los datos es documental-bibliográfico y su manipulación es de tipo no experimental.

### ***Diseño Documental-Bibliográfico***

Para este trabajo se utiliza datos recopilados de fuentes bibliográficas, de entre ellos se tiene a libros, revistas científicas, artículos científicos, atlas bioenergéticos, entre otros. La información revisada establecerá la pauta para tomar en cuenta la elección más adecuada del proceso para disposición final de los polímeros y la biomasa disponible en el Ecuador.

### **Nivel de investigación**

La profundidad del estudio viene determinada en función del nivel de investigación.

#### ***Nivel exploratorio***

Se selecciona este nivel de investigación, dado que no se ha encontrado investigaciones previas que describa los procesos más utilizados en la degradación de los residuos poliméricos y la biomasa disponible en el Ecuador, para crear una posible alternativa de generación de productos de mayor valor y así contribuir a la minimización de plásticos en el país.

Por lo que, en investigaciones previas a este estudio, se investigan los tipos de residuos poliméricos que se producen en el Ecuador, su cantidad, como también la biomasa que se posee en el país, y así proponer una posible alternativa de generación de un producto de mayor valor y que puedan ser factibles de obtener.

#### ***Nivel Descriptivo***

Se establece este nivel de investigación, debido a que en el estudio se describirán los procesos más utilizados de degradación de los polímeros, y la biomasa disponible en el Ecuador, para elegir el mejor proceso de degradación y de esta manera crear una posible

alternativa para la producción de elementos con valor agregado, y así tratar de minimizar la cantidad de residuos plásticos que existen en el país. Con el propósito de tener la información de manera ordenada y clasificada, se propone realizar tablas y gráficos.

### **Técnicas e instrumento de recolección de información**

#### ***Análisis Documental***

Se utilizará esta técnica dado que la información recolectada de fuentes secundarias como investigaciones y trabajos encontrados en el internet será ordenada, clasificada y almacenada de acuerdo con el aporte que estas muestren para estimar las variables de interés del tema propuesto, para el presente estudio el instrumento a utilizar es una laptop con acceso a internet.

#### ***Análisis de Contenido***

Para este trabajo se requiere de esta técnica con el propósito de identificar y reconocer las características bibliográficas de las fuentes seleccionadas durante la creación de citas y referencias bibliográficas, por lo tanto, para este fin se utiliza como instrumento el gestor bibliográfico con el software Mendeley, que este también a la vez permite acceder a los contenidos cargados por varios usuarios.

#### ***Procesamiento de información***

La información encontrada y recopilada será procesada con base a una revisión crítica y detallada, para de esta manera eliminar la información que presente datos contradictorios, ya sea por difícil interpretación, información incompleta, incomprensible, etc.

#### ***Discusión de Resultados***

La discusión de resultados se realizará en base a toda la información documentada y se procederá a interpretar y organizar las referencias y así obtener la mayor cantidad de datos importantes de los procesos de degradación de los polímeros existentes y la cantidad de biomasa que se dispone en el país, para crear una posible alternativa de generación de un

producto de mayor valor, con el objetivo de restar la cantidad de residuos plásticos del país, sustentando la opción de manera bibliográfica sus razones de elecciones.

## Capítulo IV

### Análisis e interpretación de los resultados

El presente trabajo se describe los procesos que mayormente se utilizan para la degradación de los polímeros a nivel mundial; además, se presenta los polímeros que más empleados en el Ecuador, la disponibilidad de biomasa en el Ecuador y finalmente los procesos que permitan aprovechar la disposición final de los residuos plásticos para generar un producto de mayor valor.

### Procesos mayormente utilizados en la degradación de polímeros

Los procesos de tratamiento de los residuos poliméricos se pueden clasificar como se presentan en la Tabla 5. Donde cada técnica presenta ventajas propias que depende del lugar, aplicación y/o requisitos necesarios para su disposición.

**Tabla 5**

#### *Tratamiento de residuos plásticos sólidos*

<b>Tratamiento</b>	<b>Acción</b>
Re-extrusión (Reciclaje primario)	<p>Se emplea plástico de desecho casi limpios que ingresan al paso de extrusión para producir compuestos parecidos a los productos originales.</p> <p>En Reino Unido cerca del 95% de plásticos producidos se trata por esta técnica.</p> <p>Este tipo de reciclaje no es rentable, debido a que interviene la recogida de cantidades pequeñas de residuos sólidos plásticos mezclados.</p>

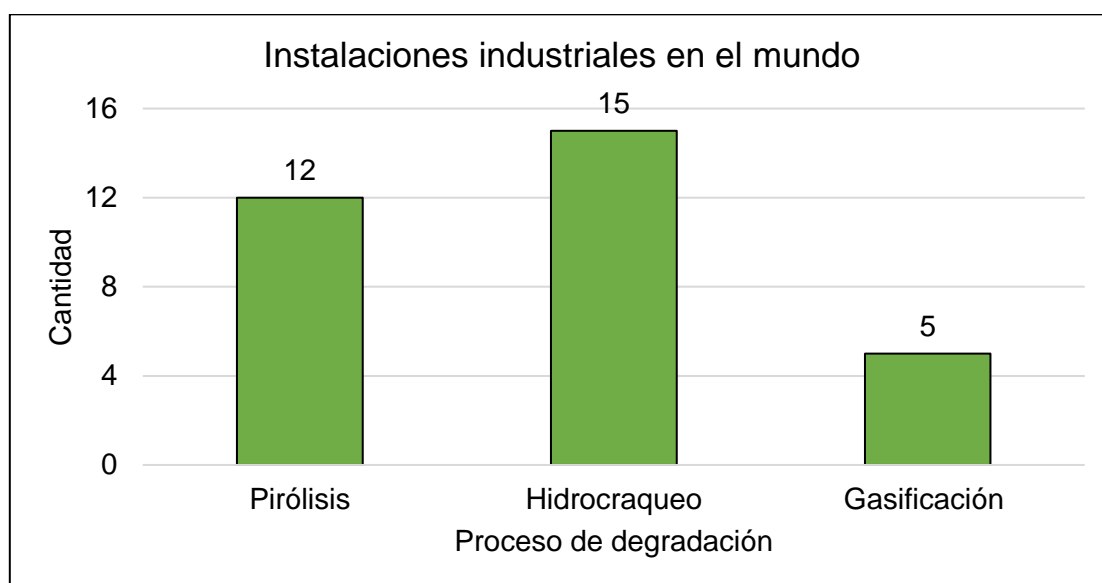
Tratamiento	Acción
Reciclado Mecánico (Reciclaje Secundario)	<p>Se utiliza a los residuos plásticos en la fabricación de productos plásticos a través de técnicas mecánicas, este solo se puede realizarse en plásticos de un solo polímero. Está la reutilización directa, extracción y la segregación.</p> <p>Este tipo de reciclaje presenta la desventaja de una alta tasa de deterioro de las propiedades de los productos reprocesados, posiblemente por la disminución del peso molecular en la ruptura de la cadena.</p>
Reciclaje químico (Reciclaje Terciario)	<p>Convierten a los polímeros en monómeros, que son de uso como materia prima o como combustible en la industria petroquímica. La ventaja de este proceso es la posibilidad de tratar polímeros heterogéneos y contaminados. Estos procesos proporcionan un alto rendimiento del producto y menor cantidad de residuos. Está la pirólisis, hidrólisis, gasificación e hidrocraqueo</p> <p>Además, se estima que permiten recuperar fracciones de monómero de hasta el 60%, proceso más conocido como la recuperación petroquímica.</p> <p>Contribuye al principio de sostenibilidad energética.</p>
Recuperación de energía (Reciclaje Cuaternario)	<p>Proceso que se emplea para obtener el contenido energético de los residuos poliméricos, en este proceso se genera gases contaminantes, que si pueden ser controlados con la presencia de carbón activado.</p> <p>Permite reducir el contenido de materia volátil, pero afecta al ambiente y la energía que se produce es menor a comparación con otro reciclaje.</p>

*Nota.* Adaptada de (Thermochemical Treatment of Plastic Solid Waste); (Current technologies for plastic waste treatment: A review); (Conversion of Waste Plastic to Oils for Tribological Applications).

En la Figura 5 se recopila los procesos más utilizados en la degradación de los polímeros a nivel mundial. Donde el hidrocraqueo lidera como tratamiento siendo el menos usado la gasificación, y en un nivel intermedio la pirólisis.

**Figura 5**

*Instalaciones industriales de degradación de los plásticos*



*Nota:* La figura representa la cantidad de instalaciones que emplea los diferentes procesos de degradación de los residuos poliméricos. Reproducida con base a la información de (Technologies for chemical recycling of household plastics – A technical review and TRL assessment).

Con base a la información proporcionada por la Figura 5, se elabora la Tabla 6, donde se ha presentado la descripción de los procesos de degradación de los polímeros más utilizados, sus condiciones, factores y productos.

**Tabla 6**

*Descripción de los procesos de degradación de los polímeros.*

<b>Proceso</b>	<b>Descripción</b>	<b>Condiciones</b>	<b>Factores</b>	<b>Productos</b>	<b>Documentos durante 15 años: Scopus – Web of Science</b>
Pirólisis	Con esta técnica el polímero se convierte en moléculas más pequeñas por medio de degradación térmica. En ausencia de oxígeno. Además, permite tratar residuos que provienen de hidrocarburos y generar un gas combustible amigable con el ambiente, por el alto poder calorífico que este presenta.	T= 300 a 900 °C Tiempo de retención = 3 a 1500 s	Temperatura Tiempo de retención Tipo de reactor Catalizadores	Líquidos complejos mixtos Ceras C19+ Hidrocarburos del rango del diésel (C11—C18) y de la gasolina (C6-C12) Gas combustible	686-480
Gasificación	Convertir a los polímeros en gas de síntesis. El proceso consta de dos etapas la licuefacción y la gasificación.	T= 1200 a 1500 °C	Temperatura Cantidad de oxígeno	CO <sub>2</sub> CO	147-80

Proceso	Descripción	Condiciones	Factores	Productos	Documentos durante 15 años: Scopus – Web of Science
Gasificación	<p>Requiere de la presencia de oxígeno.</p> <p>Este proceso no ha sido aplicado universalmente, porque sus rendimientos de producción de gas son bajos, y produce cantidades considerables de carbón</p>	<p>Alta Presión</p> <p>T= (350 a 400) °C</p>	Catalizadores	<p>H<sub>2</sub></p> <p>CH<sub>4</sub></p> <p>Hidrocarburos ligeros</p>	32-20
Hidrocraqueo	<p>Consiste en la ruptura de los polímeros en moléculas pequeñas por la adición de H<sub>2</sub>.</p> <p>El proceso no ha sido aceptado, al evidenciarse en las pruebas piloto, a causa de problemas financieros.</p>	<p>T= (200 a 300) °C</p> <p>Altas presiones</p>	<p>Presión</p> <p>Temperatura</p> <p>Catalizadores</p>	<p>Gasolina</p> <p>Queroseno</p>	152-117
Hidrólisis	<p>Consiste en despolimerizar al polímero en presencia de una solución acuosa sea alcalina, neutra o ácida</p>	<p>T= (200 a 300) °C</p> <p>Altas presiones</p>	<p>Presión</p> <p>Temperatura</p> <p>Catalizadores</p>	<p>Monómero</p> <p>Reactivos iniciales</p>	152-117



Proceso	Descripción	Condiciones	Factores	Productos	Documentos durante 15 años: Scopus – Web of Science
Hidrólisis	Con esta técnica se recupera las materias primas del polímero al hacer reaccionar a este con el agua, que vendrían a ser los monómeros o compuestos iniciales del polímero.				
Incineración	Consiste en la combustión del polímero, debido a su valor calorífico, que es semejante a los combustibles convencionales. Es el proceso más barato, cerca del 50% de plásticos se tratan por este método.	Reactor de lecho fluidizado	Catalizadores Tipo de reactor	CO <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O Gases tóxicos HAP's	602-218

*Nota.* Adaptada de (Thermochemical Treatment of Plastic Solid Waste); (Current technologies for plastic waste treatment: A review).

Con base a la información expuesta en la Tabla 5 y Tabla 6, se puede decir que los procesos que permiten obtener productos con un valor agregado son los del reciclaje químico, por el rendimiento energético. Asimismo, es importante mencionar que los procesos se aplican dependiendo el producto, ya sea un combustible líquido o un gas.

Tras la revisión bibliográfica expuesto en la Tabla 6 se puede decir que cada proceso depende lo que se requiera, debido a que cada uno presenta sus ventajas y desventajas, como es el caso de la pirólisis para obtener un producto líquido, pero si se aprovecha energéticamente la biomasa que se dispone en el Ecuador se tendría a la copirólisis. Si se requiere de un producto gaseoso lo más viable será la gasificación, pero el consumo energético de este proceso es elevado. Por tal motivo a través de estos procesos se puede generar energía que a la vez puede ser utilizada en diferentes áreas. De este modo se trataría de cumplir con algunos de los principios de la química verde que se enfocan en la degradación y reutilización de residuos y de esta manera disminuir la contaminación ambiental.

Es importante mencionar que cada uno de los procesos permite cumplir con el principio del uso de catalizadores, donde este debe presentar selectividad y mejorar la producción de productos útiles tales como el gas de síntesis y los combustibles líquidos como la gasolina y el diésel. Otro principio es el del diseño de la degradación de productos obtenidos, en el que se busca degradar residuos por medio de ciertos tratamientos, con el objetivo de disminuir la cantidad de plásticos que van incrementando cada año y se van acumulando en la superficie.

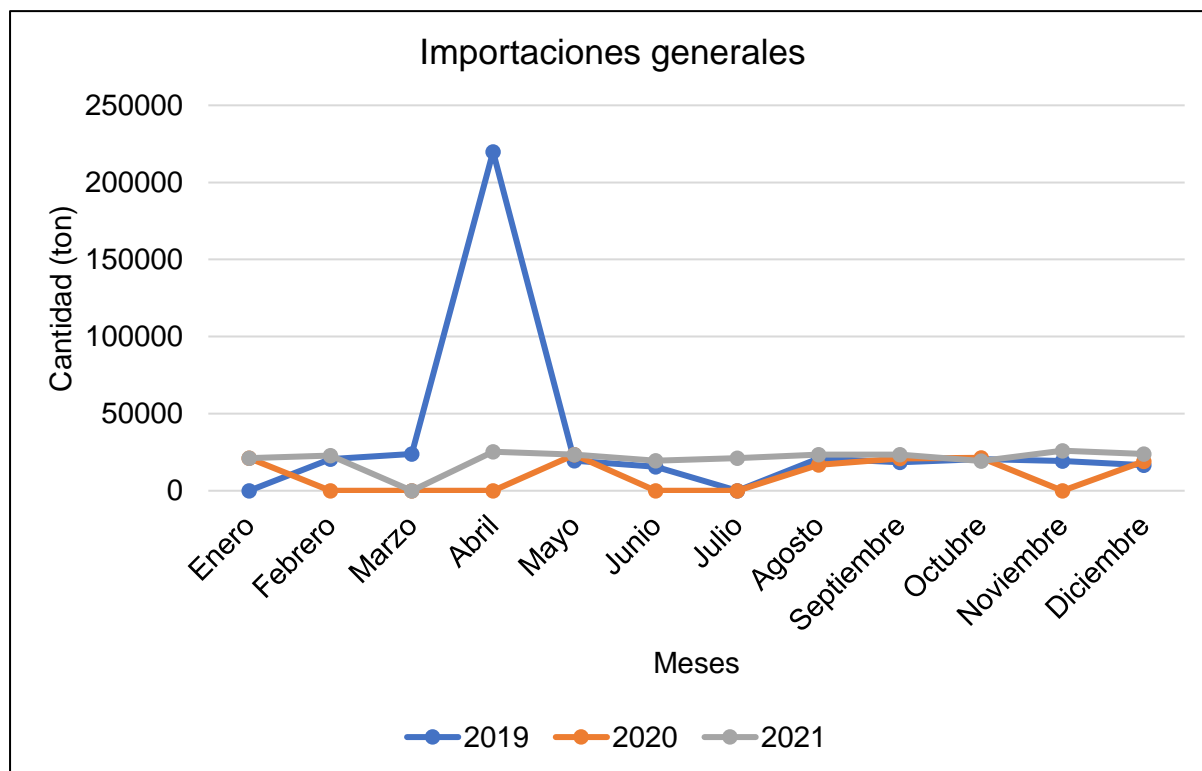
### **Polímeros que importa el Ecuador**

En la Figura 6 se ha presentado un resumen de las importaciones de los principales polímeros empleados en el Ecuador que son el PE, PP, PC y PET, es así como se evidencia que en el mes de abril del 2019 ha ingresado mayor cantidad de polímeros al país, en cuanto al año 2021 se ha tenido una importación casi constante entre 10 y 20 mil

toneladas al mes, mientras que en el año de 2020 se tiene 0 importaciones en los meses de febrero, marzo, abril, junio, julio y noviembre, claro resultado de la pandemia del COVID-19. En conclusión, en el año 2019 ha ingresado mayor cantidad de polímeros al Ecuador.

**Figura 6**

*Importaciones de los principales polímeros utilizados en el Ecuador*



*Nota.* Reproducida con base a los datos extraídos de SENA E, 2022

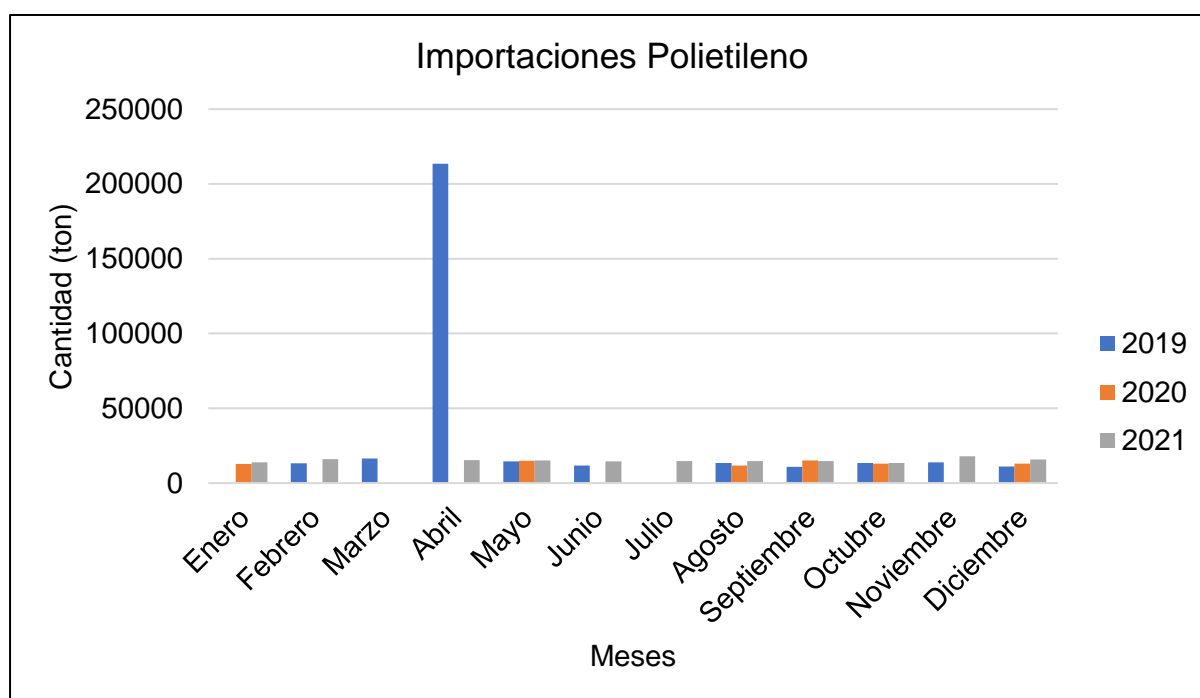
### **Polietileno**

En la Figura 7 se ha reportado un resumen de las importaciones del PE durante tres años consecutivos, por lo tanto se presenta que en el año 2019, específicamente en el mes de abril se ha importado mayor cantidad de PE, mientras que en los otros meses se mantiene casi constante con cantidades menores a 50 000 ton; en el 2020 se observa claramente que las importaciones son muy bajas a causa de la pandemia del COVID-19 con cantidades menores a 20 000 ton; y por último se tiene en el 2021, donde las importaciones del PE se elevan hasta cantidades superiores a las 17 000 ton particularmente en el mes de

septiembre. En comparación de los tres años en el 2019 ha ingresado mayor cantidad de PE al Ecuador.

### Figura 7

*Comparación de importaciones del PE al Ecuador*



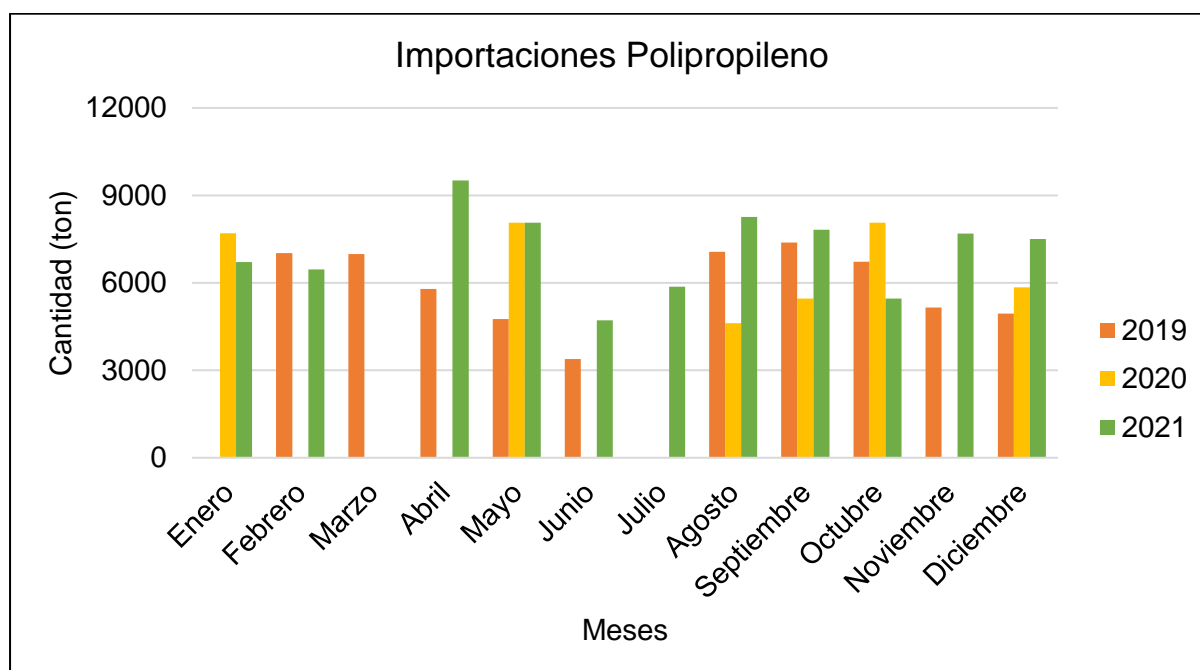
*Nota.* Reproducida con base a los datos extraídos de SENA E, 2022

### **Polipropileno**

En la Figura 8 se ha reportado un resumen de las importaciones del PP por parte del Ecuador durante tres años consecutivos, de tal manera se presenta que, en el año 2019, en los meses de enero y julio no se ha importado, mientras que en los otros meses si se tiene importaciones de hasta 7 500 ton; en el año 2020 no ha ingresado PP en seis meses a causa de la pandemia del COVID-19; en cuanto al 2021 las importaciones del PP han aumentado que en abril se ha importado 9 500 ton. En comparación de los tres años en el 2021 ha ingresado mayor cantidad del PP al Ecuador.

**Figura 8**

*Comparación de importaciones del PP al Ecuador*



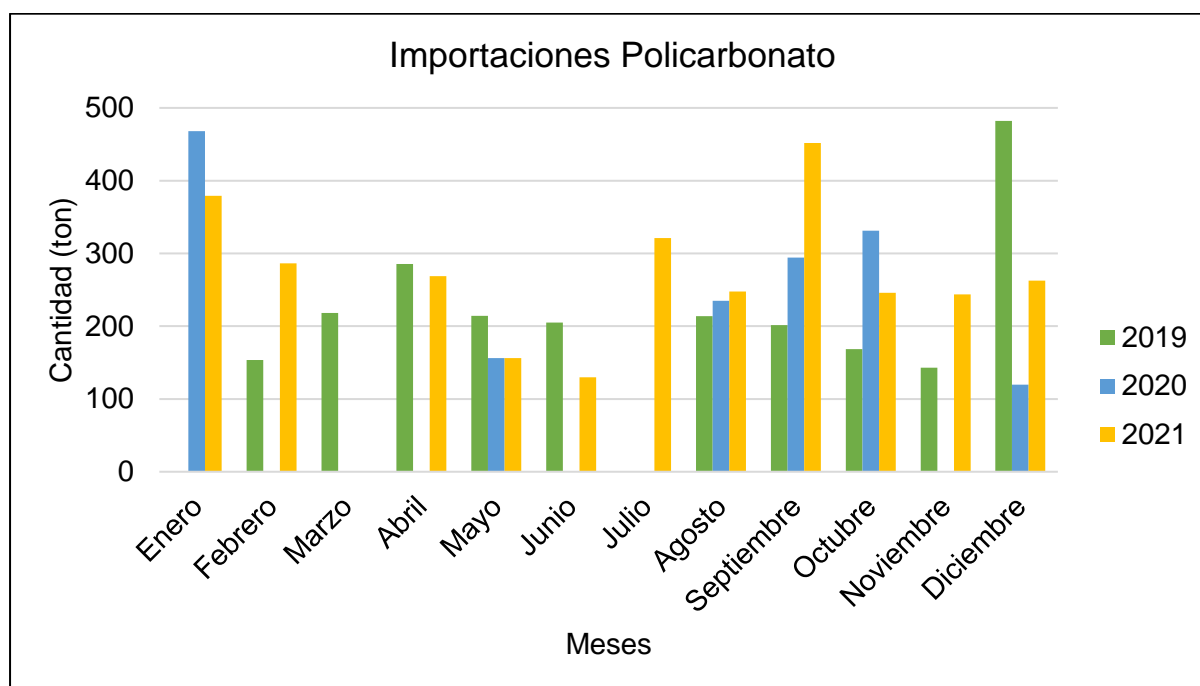
*Nota.* Reproducida con base a los datos extraídos de SENA E, 2022

### **Policarbonato**

En la Figura 9 se ha reportado un resumen de las importaciones por parte del Ecuador del PC durante tres años consecutivos, de tal manera muestra que, en el año 2019, en los meses de enero y julio no se ha importado, mientras que en los otros meses si se tiene importaciones de hasta 480 ton; en el año 2020 no ha ingresado PC en seis meses a causa de la pandemia del COVID-19, aunque a partir del mes de agosto se tiene una tendencia de aumento de importaciones de hasta 330 ton; en cuanto al 2021 las importaciones del PC han aumentado que en el mes de septiembre se ha alcanzado un valor de 450 ton. En comparación de los tres años en el 2021 ha ingresado mayor cantidad del PC al Ecuador.

**Figura 9**

*Comparación de importaciones del PC al Ecuador*



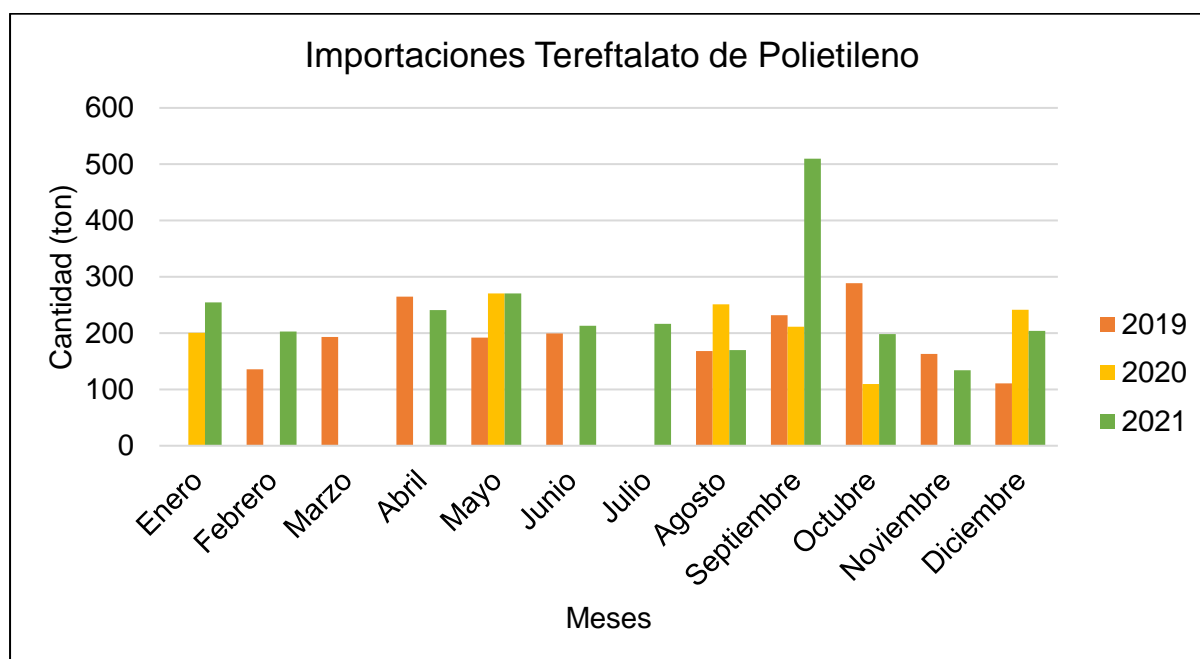
*Nota.* Reproducida con base a los datos extraídos de SENA E, 2022

### ***Tereftalato de Tereftalato de Polietileno***

En la Figura 10 se ha reportado un resumen de las importaciones del PET por parte del Ecuador durante tres años consecutivos, de tal manera muestra que, en el año 2019, en los meses de enero y julio no se ha importado, mientras que en los otros meses si se tiene importaciones de hasta 290 ton en el mes de octubre; en el año 2020 no ha ingresado PET en seis meses a causa de la pandemia del COVID-19, aunque a partir del mes de agosto a octubre, en mayo se tiene la mayor importación de alrededor de 270 ton; en cuanto al 2021 las importaciones del PET han aumentado que en el mes de septiembre se ha alcanzado un valor superior a 500 ton. En comparación de los tres años en el 2021 ha ingresado mayor cantidad del PET al Ecuador.

**Figura 10**

*Comparación de importaciones del PET al Ecuador*



*Nota.* Reproducida con base a los datos extraídos de SENA E, 2022

### **Disponibilidad de biomasa en el Ecuador**

En la Tabla 7 se describe los productos que generan biomasa de manera significativa en el Ecuador y la cantidad de residuos de estos que se dispone al año en el país.

**Tabla 7**

*Disponibilidad de biomasa en el Ecuador*

<b>Disponibilidad</b>	
<b>Producto</b>	<b>Cantidad de residuos (ton/año)</b>
Palma africana	6 841 709,35
Banano	4 891 143,61
Arroz	2 101 948,94

<b>Disponibilidad</b>	
<b>Producto</b>	<b>Cantidad de residuos (ton/año)</b>
Cacao	2 014 727,89
Caña de azúcar	784 721,26
<b>TOTAL</b>	<b>16 634 251,06</b>

*Nota.* Adaptada de (Atlas Bioenergético de Ecuador).

Es así como, con los datos reportados en la Tabla 7 es posible decir que la palma africana es el producto agrícola que genera mayor cantidad de residuos en el Ecuador y que pueden ser aprovechada para producir energía a partir de esta, en segundo lugar, se tiene a los residuos del banano, seguido del arroz y con los últimos lugares respectivamente a los residuos del cacao y caña de azúcar.

Con la información de la Tabla 8, se corrobora la generación de la biomasa por parte de los cinco productos presentados en la Tabla 7, de tal modo, que en base a su producción se puede estimar que las cantidades de generación de residuos másicos ha ido incrementando, como es el caso de la caña de azúcar, que ha incrementado en gran proporción, a comparación de los otros productos que han ido incrementando de una manera casi constante.

**Tabla 8**

*Comparación de producción de productos que aportan a la biomasa*

<b>Producto</b>	<b>Producción (ton/año)</b>		
	<b>2014</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>
Cacao	162 724,77	283 000,70	320 000,00
Banano	7 410 823,66	6 583 500,00	6 023 390,00
Palma africana	2 670 143,76	2 275 950,00	2 446 310,00
Caña de azúcar	4 904 507,87	9 257 700,00	11 016 170,00



<b>Producción (ton/año)</b>			
	<b>2014</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>
TOTAL	16 712 441,13	19 499 850,70	21 142 370,00

*Nota.* Adaptada de (Atlas Bioenergético de Ecuador); (Biblioteca – Corporación Financiera Nacional); (La cadena de producción del Cacao en Ecuador: Resiliencia en los diferentes actores de la producción).

En la Tabla 9 se describe las provincias que generan biomasa de manera significativa en el Ecuador y la cantidad que genera al año cada provincia.

**Tabla 9**

*Disponibilidad de biomasa por provincias del Ecuador*

<b>Disponibilidad</b>	
<b>Provincia</b>	<b>Cantidad de residuos (ton/año)</b>
Esmeraldas	4 259 399,32
Los Ríos	4 247 644,58
Guayas	3 891 128,69
El Oro	1 560 533,98
Pichincha	791 272,01
TOTAL	14 749 978,59

*Nota.* Adaptada de (Atlas Bioenergético de Ecuador).

De este modo, con los datos expuestos en la Tabla 9 se puede decir que la provincia de Esmeraldas es la que mayor cantidad de toneladas de residuos agrícolas anuales genera en el Ecuador, seguida de Los Ríos, en tercer lugar, se ubica la provincia del Guayas, en cuarta posición el Oro y por último a Pichincha con una generación de 791 272,01 toneladas de residuos al año.

### **Comparación de caracterización de la biomasa**

En la Tabla 10 se realiza la comparación de propiedades de la biomasa de dos estudios de cada uno de los residuos que se producen en mayor porcentaje en el Ecuador.

**Tabla 10**

*Comparación de propiedades de los tipos de biomasa*

<b>Producto</b>	<b>Celulosa (%m)</b>	<b>Hemicelulosa (%m)</b>	<b>Lignina (%m)</b>	<b>Referencias</b>
Palma	34,40 ± 3,9	22,80 ± 6,8	22,0 ± 4,7	(Magalhães et al., 2019)
africana	32,22 ± 1,54	31,62 ± 0,46	23,89 ± 1,12	(Chieng et al., 2017)
Banano	33,8 ± 7,8	20,40 ± 8,6	18,30 ± 5,2	(Magalhães et al., 2019)
	20,1 ± 1,31	9,6 ± 0,53	10,1 ± 0,97	(Guerrero et al., 2017)
Arroz	29,1 ± 0,8	16,3 ± 1,0	24,2 ± 0,1	(Wang et al., 2018)
	34,9 ± 3,6	22,1 ± 5,2	17,6 ± 5,6	(Magalhães et al., 2019)
Cacao	33,02 ± 2,2	37,0 ± 0,1	23,75 ± 2,5	(Meza-Sepúlveda et al., 2021)
	23,80 ± 0,3	8,20 ± 0,1	33,40 ± 0,2	(Susanti et al., 2020)
Caña de	35,3 ± 2,8	27,5 ± 4,5	19,0 ± 3,2	(Magalhães et al., 2019)
azúcar	58,76 ± 0,28	17,67 ± 0,21	12,74 ± 0,30	(Ponce et al., 2021)

De la Tabla 10 que se ha reportado, se puede decir que los residuos de la caña de azúcar presentan un alto contenido de celulosa que va desde los 35,3 a los 58,76 y con menor cantidad de celulosa a los residuos de banano; en cuanto al contenido de hemicelulosa se tiene a los residuos de la palma africana en primer lugar que está en un rango de 22,80 a 31,62, además en esta propiedad se encuentra también los residuos de banano con menor contenido de hemicelulosa; en cuanto al contenido de lignina se tiene a

los residuos del cacao primer lugar con unos valores entre 23,75 a 33,40 y en el último lugar a los residuos del banano.

### **Comparación de análisis proximal de cada tipo de biomasa**

#### **Palma Africana**

En la Tabla 11 se realiza la comparación del análisis proximal de 3 estudios de los residuos de la palma africana.

**Tabla 11**

*Comparación de análisis proximal de estudios de la palma africana*

<b>Palma africana</b>	(Garivait et al., 2006)		(Shariff et al., 2014)	(Quintero & Torres, 2019)	
	Fibra	Árbol	Cáscara	Cascarilla	Fibra
Humedad (%)	31,84	48,4	1,33	11,54	35,44
Materia volátil (%)	48,61	38,7	77,46	68,32	47,84
Cenizas (%)	6,35	1,2	5,29	1,68	4,11
Carbón fijo (%)	13,2	11,7	17,25	18,46	12,61
Poder calorífico (MJ/kg)	13,548	9,354	---	19,3556	13,9295

Los resultados mostrados en la Tabla 11 indican que los residuos de la palma africana generan mayor cantidad de materia volátil al realizar el análisis proximal en las tres investigaciones, en cuanto al contenido de ceniza se encuentra en un rango de 1 a 6,5, y una humedad de 1 a 50 en porcentaje peso de las muestras analizadas, finalmente el contenido de carbón fijo está entre 11 a 18,5 %.

#### **Banano**

En la Tabla 12 se realiza la comparación del análisis proximal de 3 estudios de los residuos del banano.

**Tabla 12**

*Comparación de análisis proximal de estudios del banano*

<b>Banano</b>	(Cardona et al., 2021) (Bot et al., 2021) (Faria et al., 2022)		
	Cáscaras	Cáscara	Residuos del cultivo
Humedad (%)	15,87	7,64	5,09
Materia volátil (%)	59,3	60,92	64,73
Cenizas (%)	5,24	11,95	12,13
Carbón fijo (%)	19,59	19,49	18,05
Poder calorífico (MJ/kg)	9,91	16,983	---

En cuanto a los resultados mostrados en la Tabla 12 indican que los residuos del banano generan mayor cantidad de materia volátil en un rango de 59 a 65 en porcentaje peso al realizar el análisis proximal en las tres investigaciones, en cuanto al contenido de ceniza se encuentra en un rango de 5 a 12,5, y una humedad de 5 a 16 en porcentaje peso de las muestras analizadas, finalmente el contenido de carbón fijo está entre 18 y 20 % peso. En este caso se han estudiado a cáscaras y a residuos de cultivo de banano.

### **Arroz**

En la Tabla 13 se realiza la comparación del análisis proximal de 3 estudios de los residuos del arroz.

**Tabla 13**

*Comparación de análisis proximal de estudios del arroz*

<b>Arroz</b>	(Garivait et al., 2006) (Quoc et al., 2019) (Zinla et al., 2021)					
	Paja	Cáscara	Paja	Cáscara	Paja	Cáscara
Humedad (%)	6,65	8,2	13,13	2,5	9,52	7,82

<b>Arroz</b>	(Garivait et al., 2006)		(Quoc et al., 2019)		(Zinla et al., 2021)	
	Paja	Cáscara	Paja	Cáscara	Paja	Cáscara
Materia volátil (%)	60,9	58,9	58,34	68,69	64,86	64,02
Cenizas (%)	19,11	13,2	13,47	12,85	23,7	14,96
Carbón fijo (%)	13,34	19,7	15,06	15,86	1,92	13,2
Poder calorífico (MJ/kg)	13,233	15,4	---	---	---	---

Los resultados presentados en la Tabla 13 indican que los residuos del arroz tanto para la paja como también para la cáscara, generan mayor cantidad de materia volátil en un rango de 58 a 65 en porcentaje peso al realizar el análisis proximal en las tres investigaciones, en cuanto al contenido de ceniza se encuentra en un rango de 12 a 19,5, y una humedad de 2,5 a 13,5 en porcentaje peso de las muestras analizadas, finalmente el contenido de carbón fijo está entre 1 a 20 % peso.

### **Cacao**

En la Tabla 14 se realiza la comparación del análisis proximal de 3 estudios de los residuos del cacao.

**Tabla 14**

*Comparación de análisis proximal de estudios del cacao*

<b>Cacao</b>	(Adjin-Tetteh et al., 2018)	(Gil et al., 2019)	(Zinla et al., 2021)
	Humedad (%)	11,07	6,7
Materia volátil (%)	61,73	70,43	66,32
Cenizas (%)	16,24	7,9	10,77
Carbón fijo (%)	10,96	21,67	10,61
Poder calorífico (MJ/kg)	12,48	19,067	---

Los resultados presentados en la Tabla 14 indican que los residuos del cacao generan mayor cantidad de materia volátil en un rango de 60 a 71 en % peso al realizar el análisis proximal en las tres investigaciones, en cuanto al contenido de ceniza se encuentra en un rango de 7 a 17, y una humedad de 6 a 12,5 en % peso de las muestras analizadas, finalmente el contenido de carbón fijo está entre 10 a 22 % peso.

### ***Caña de Azúcar***

En la Tabla 15 se realiza la comparación del análisis proximal de 3 estudios de los residuos de la caña de azúcar.

**Tabla 15**

*Comparación de análisis proximal de estudios de la caña de azúcar*

<b>Caña de azúcar</b>	(Quoc et al., 2019)	(Santos et al., 2019)	(Bot et al., 2021)
Humedad (%)	13,17	6,7	5,97
Materia volátil (%)	76,03	70,43	63,54
Cenizas (%)	1,36	7,9	11,511
Carbón fijo (%)	9,43	21,67	18,98
Poder calorífico (MJ/kg)	---	19,067	25,938

Los resultados presentados en la Tabla 15 indican que los residuos de la caña de azúcar generan mayor cantidad de materia volátil en un rango de 63 a 71 en % peso al realizar el análisis proximal en las tres investigaciones, en cuanto al contenido de ceniza se encuentra en un rango de 1 a 12, y una humedad de 5 a 14 en % peso de las muestras analizadas, finalmente el contenido de carbón fijo está entre 9 a 22 % peso.

## Procesos que permiten aprovechar la disposición final de residuos plásticos

### *Copirólisis del PE*

En la Tabla 16 se reporta el resumen de los porcentajes de los rendimientos de los productos de la copirólisis del PE con diferentes residuos como biomasa.

**Tabla 16**

*Comparación de productos de estudios de copirólisis del PE*

<b>Alimentación</b>	<b>Líquido (%)</b>	<b>Gas (%)</b>	<b>Sólido (%)</b>	<b>Contenido de agua (%)</b>	<b>Referencia</b>
Cedro/LDPE (T=600 °C)	64,08	7,98	12,01	15,94	(Yang et al., 2016)
Pino/LDPE (T=550 °C) (Catalizador ZSM-5)	7,6	76,1	11,8	4,5	(Rahman et al., 2021)
Piña/PE (T=500°C)	45,0	16,5	19,6	18,9	(Brebu et al., 2010)

Al analizar los valores de la Tabla 16, se ha evidenciado que en el trabajo de la copirólisis del pino con LDPE presenta una mayor generación de gas lo que tendría como producto el gas de síntesis, a comparación con la copirólisis del cedro con el LDPE que genera un producto líquido, que este a la vez puede ser gasolina, que vienen a ser productos de valor agregado y por lo tanto si es posible tratar a los residuos poliméricos para convertirlos en elementos de mayor valor.

### **Copirólisis del PP**

En la Tabla 17 se reporta el resumen de los porcentajes de los rendimientos de los productos de la copirólisis del PP con diferentes residuos como biomasa.

**Tabla 17**

*Comparación de productos de estudios de copirólisis del PP*

<b>Alimentación</b>	<b>Líquido (%)</b>	<b>Gas (%)</b>	<b>Sólido (%)</b>	<b>Contenido de agua (%)</b>	<b>Referencia</b>
Piña/PP (T=500 °C)	45,7	16,8	19,1	18,4	(Brebú et al., 2010)
Pino/PP	85,66	11,68	2,67	---	(Sajdak &
Aliso/PP	83,11	14,28	2,59	---	Muzyka, 2014)
Biomasa mixta/PP					
Catalizador: ZSM-5 (T=500 °C)	51,60	35,9	15,1	---	(Dyer et al., 2021)

Al analizar los valores de la Tabla 17, se ha evidenciado que en el trabajo de la copirólisis de la biomasa mixta con PP presenta una mayor generación de gas lo que se tendría como producto el gas de síntesis, a comparación con la copirólisis del pino con el PP que genera un producto líquido, que este a la vez también puede ser gasolina, que vienen a ser productos de valor agregado y por lo tanto si es posible tratar a los residuos poliméricos para convertirlos en elementos de mayor valor y así aprovechar residuos agrícolas y plásticos.



### ***Copirólisis del PC***

En la Tabla 18 se reporta el resumen de los porcentajes de los rendimientos de los productos de la copirólisis del PC.

**Tabla 18**

*Productos de un estudio de copirólisis del PC*

<b>Alimentación</b>	<b>Líquido (%)</b>	<b>Gas (%)</b>	<b>Sólido (%)</b>	<b>Contenido de agua (%)</b>	<b>Referencia</b>
Pino/PC	7,7	77,2	15,1	---	(Liu et al., 2021)

Al analizar los valores de la Tabla 18, se ha evidenciado que en el trabajo de la copirólisis de la biomasa mixta con PC presenta una mayor generación de gas lo que se tendría como producto el gas de síntesis, que vienen a ser un producto de valor agregado y por lo tanto si es posible tratar a los residuos del PC para convertir en elementos de mayor valor y así aprovechar residuos agrícolas y plásticos. Cabe mencionar que no se ha realizado una comparación, debido a la escases de investigaciones de copirólisis del PC con la biomasa.

### ***Copirólisis del PET***

En la Tabla 19 se reporta el resumen de los porcentajes de los rendimientos de los productos de la copirólisis del PET con diferentes residuos como biomasa.

**Tabla 19***Comparación de productos de estudios de copirólisis del PET*

<b>Alimentación</b>	<b>Líquido (%)</b>	<b>Gas (%)</b>	<b>Sólido (%)</b>	<b>Contenido de agua (%)</b>	<b>Referencia</b>
Cáscara de nuez/PET (T=500 °C)	28,90	29	25,90	16,2	(Özsin & Pütün, 2018)
Huesos de melocotón/PET (T=500 °C)	23,45	38,05	28,50	10	
Biomasa mixta/PP Catalizador: ZSM-5 (T=500 °C)	37,9	22,2	37,9	---	(Dyer et al., 2021)

Al analizar los valores de la Tabla 19, se ha evidenciado que en el trabajo de la copirólisis de la biomasa mixta con PET presenta una mayor generación de gas lo que se tendría como producto el gas de síntesis, que vienen a ser un producto de valor agregado y por lo tanto si es posible tratar a los residuos del PET para convertir en elementos de mayor valor y así aprovechar residuos agrícolas y plásticos. Cabe mencionar que no se ha realizado una comparación, debido a la escases de investigaciones de copirólisis del PET con la biomasa.

Para poder verificar que es recomendable la copirólisis de los diferentes residuos agrícolas generados en el Ecuador y con los diferentes polímeros se requiere de la realización de la simulación de este proceso por medio de softwares de simulación que

entre ellos se tiene a Aspen Plus, Chemcad o AVEVA PRO/II, mismos que permiten conocer si el proceso es factible o no.

## Capítulo V

### Conclusiones y recomendaciones

#### Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos de tipo bibliográfico acerca de los procesos de degradación de los polímeros enfocados en la química verde, la pirólisis es el mejor o más apto para la producción de combustibles líquidos a comparación de la gasificación que permite obtener combustibles gaseosos. Para alcanzar la minimización de la acumulación de residuos plásticos que se generan en el Ecuador.

Al realizar el resumen de las importaciones de los principales polímeros que se importa al Ecuador de acuerdo a los datos proporcionados por el SENA, el PE es el polímero de mayor importación, seguido del PP, el PC y por último el PET, asimismo se compara sus importaciones entre los años 2019, 2020 y 2021, donde se evidencia que en el año 2019 las importaciones han sido elevadas especialmente en el mes de abril; por otro lado, se tiene al 2020 donde las importaciones son bajas a causas de la pandemia del COVID-19 y por tanto en ciertos meses no se ha importado; mientras que, en el 2021 las importaciones han incrementado y se mantienen los valores casi constantes.

En cuanto a la disponibilidad de la biomasa en el Ecuador la mayor cantidad de residuos que se genera en el país proviene de la biomasa de la segunda generación, está principalmente la palma africana, el banano, arroz, cacao y por último la caña de azúcar; de igual modo se ha expuesto las provincias que generar residuos de manera significativa y en este caso se tiene a Esmeraldas en primer lugar.

Por otra parte, al realizar la comparación en la caracterización de la biomasa, la caña de azúcar posee mayor porcentaje masa de celulosa, el cacao presenta mayor cantidad de hemicelulosa y lignina, cabe mencionar que los cinco productos expuestos muestran un alto

porcentaje masa de celulosa siendo esta una ventaja, debido a que los residuos van a volatilizarse con facilidad en el proceso de pirólisis y asimismo se evitará la generación de altas cantidades de carbón o residuos sólidos. También se ha realizado la comparación de análisis proximal para de investigaciones, para la palma africana, banano, arroz, cacao y caña de azúcar, y se ha evidenciado que la caña de azúcar presenta mayor contenido de materia volátil.

Con el propósito de cumplir con los principios de la química verde a futuro se puede sustituir los productos obtenidos de la refinación del petróleo, al aplicar la biorrefinería y dentro de esto se tiene a procesos de degradación, y de acuerdo a las investigaciones reportadas se utiliza la copirólisis de los residuos plásticos y la biomasa que contribuyen de manera energética al producir gases y líquidos combustibles.

## **Recomendaciones**

Se recomienda que en futuras investigaciones se realice simulaciones de la copirólisis para evidenciar si el proceso es factible en la generación de productos de valor agregado y amigables con el medio ambiente.

Se propone actualizar la información en cuanto a los residuos orgánicos que aportan en la biomasa del Ecuador, la última información se ha reportado en el año 2014.

Se plantea buscar información más detallada con respecto a los tipos de combustibles que se puede producir y sus cantidades a partir de la copirólisis de la biomasa y los residuos poliméricos.

### Bibliografía

- Abdussalam-Mohammeda, W., Alia, A. Q., & Errayesb, A. O. (2020). Green Chemistry: Principles, Applications, and Disadvantages. *Chemical Methodologies*, 4(4).  
<https://doi.org/10.33945/sami/chemm.2020.4.4>
- Abnisa, F., & Wan , W. M. A. (2014). A review on co-pyrolysis of biomass: An optional technique to obtain a high-grade pyrolysis oil. *Energy Conversion and Management*, 87. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.07.007>
- Adjin-Tetteh, M., Asiedu, N., Dodoo-Arhin, D., Karam, A., & Amaniampong, P. N. (2018). Thermochemical conversion and characterization of cocoa pod husks a potential agricultural waste from Ghana. *Industrial Crops and Products*, 119, 304–312.  
<https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2018.02.060>
- Ali, S. S., Elsamahy, T., Al-Tohamy, R., Zhu, D., Mahmoud, Y. A. G., Koutra, E., Metwally, M. A., Kornaros, M., & Sun, J. (2021). Plastic wastes biodegradation: Mechanisms, challenges and future prospects. In *Science of the Total Environment* (Vol. 780). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146590>
- Artham, T., & Doble, M. (2008). Biodegradation of aliphatic and aromatic polycarbonates. In *Macromolecular Bioscience* (Vol. 8, Issue 1). <https://doi.org/10.1002/mabi.200700106>
- Aspen Technology Inc. (2022). *Aspen Plus | Leading Process Simulation Software | AspenTech*. <https://www.aspentech.com/en/products/engineering/aspen-plus>
- Bain, R. L., & Broer, K. (2011). Gasification. In *Thermochemical Processing of Biomass: Conversion into Fuels, Chemicals and Power*.  
<https://doi.org/10.1002/9781119990840.ch3>
- Bîrca, A., Gherasim, O., Grumezescu, V., & Grumezescu, A. M. (2019). Introduction in thermoplastic and thermosetting polymers. *Materials for Biomedical Engineering:*

*Thermoset and Thermoplastic Polymers*, 1–28. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816874-5.00001-3>

- Bot, B. V., Sosso, O. T., Tamba, J. G., Lekane, E., Bikai, J., & Ndame, M. K. (2021). Preparation and characterization of biomass briquettes made from banana peels, sugarcane bagasse, coconut shells and rattan waste. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/S13399-021-01762-W>
- Brebu, M., Ucar, S., Vasile, C., & Yanik, J. (2010). Co-pyrolysis of pine cone with synthetic polymers. *Fuel*, 89(8), 1911–1918. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2010.01.029>
- Brunelle, D. J. (2006). Polycarbonates. *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*. <https://doi.org/10.1002/0471440264.PST255.PUB2>
- Calhoun, A. (2010). Polypropylene. In *Multilayer Flexible Packaging*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-8155-2021-4.10003-6>
- Cardona, S., Orozco, L. M., Gómez, C. L., Solís, W. A., Velásquez, J. A., & Rios, L. A. (2021). Valorization of banana residues via gasification coupled with electricity generation. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 44. <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2021.101072>
- CFN. (2022). *Biblioteca - Corporación Financiera Nacional*. <https://www.cfn.fin.ec/bibliotecainfo/>
- Chaves, I. D. G., López, J. R. G., Zapata, J. L. G., Robayo, A. L., & Niño, G. R. (2016). Process Simulation in Chemical Engineering. *Process Analysis and Simulation in Chemical Engineering*, 1–51. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-14812-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-14812-0_1)
- Chemstations. (2020). *Chemstations | Offering Chemcad Chemical Process Simulation Software*. <https://www.chemstations.com/>



- Chen, C. C., Dai, L., Ma, L., & Guo, R. T. (2020). Enzymatic degradation of plant biomass and synthetic polymers. In *Nature Reviews Chemistry* (Vol. 4, Issue 3).  
<https://doi.org/10.1038/s41570-020-0163-6>
- Chieng, B. W., Lee, S. H., Ibrahim, N. A., Then, Y. Y., & Loo, Y. Y. (2017). Isolation and characterization of cellulose nanocrystals from oil palm mesocarp fiber. *Polymers*, 9(8).  
<https://doi.org/10.3390/POLYM9080355>
- Danso, D., Chow, J., & Streita, W. R. (2019). Plastics: Environmental and biotechnological perspectives on microbial degradation. In *Applied and Environmental Microbiology* (Vol. 85, Issue 19). <https://doi.org/10.1128/AEM.01095-19>
- Demirors, M. (2011). The history of polyethylene. *ACS Symposium Series*, 1080, 115–145.  
<https://doi.org/10.1021/BK-2011-1080.CH009>
- Dyer, A. C., Nahil, M. A., & Williams, P. T. (2021). Catalytic co-pyrolysis of biomass and waste plastics as a route to upgraded bio-oil. *Journal of the Energy Institute*, 97, 27–36. <https://doi.org/10.1016/J.JOEI.2021.03.022>
- East, A. J. (2009). The structure of polyester fibers. *Handbook of Textile Fibre Structure*, 1, 181–231. <https://doi.org/10.1533/9781845696504.2.181>
- ESIN Consultora S.A. (2014). *ATLAS Bioenergético del Ecuador* (Primera).
- Faria, F. A., Faria, F. A., Mattioli, L., Dias, D. S., Gomes Neto, J. A., Capela, J. M. V., Crespi, M. S., Capela, M. v., & Ribeiro, C. A. (2022). Fertilizer release kinetics incorporated to torrefied banana-crop residues. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 147(5), 3659–3671. <https://doi.org/10.1007/S10973-021-10764-9>
- Feldman, D., & Barbalata, A. (1996). *Synthetic Polymers: Technology, properties, applications* (1era ed.). Chapman & Hall.
- Filatov, V. v., Zaitseva, N. A., Larionova, A. A., Zhenzhebir, V. N., Polozhentseva, I. v., Takhumova, O. v., & Kolosova, G. M. (2018). State management of plastic production

based on the implementation of UN decisions on environmental protection. *Ekoloji*, 27(106).

Gahleitner, M., & Paulik, C. (2017). Polypropylene and Other Polyolefins. *Brydson's Plastics Materials: Eighth Edition*, 279–309. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-35824-8.00011-6>

García-Briones, A. R., Pico-Pico, B. F., Jaimez, R., García-Briones, A. R., Pico-Pico, B. F., & Jaimez, R. (2021). La cadena de producción del Cacao en Ecuador: Resiliencia en los diferentes actores de la producción. *Revista Digital Novasinergia*, 4(2), 152–172. <https://doi.org/10.37135/NS.01.08.10>

Garivait, S., Chaiyo, U., Patumsawad, S., & Deakhuntod, J. (2006). Physical and chemical properties of thai biomass fuels from agricultural residues. *La 2ª Conferencia Internacional Conjunta Sobre Energía Sostenible y Medio Ambiente*, 1–23. [https://www.researchgate.net/publication/228726044\\_Physical\\_and\\_chemical\\_properties\\_of\\_Thai\\_biomass\\_fuels\\_from\\_agricultural\\_residues](https://www.researchgate.net/publication/228726044_Physical_and_chemical_properties_of_Thai_biomass_fuels_from_agricultural_residues)

Gil, M. v., González-Vázquez, M. P., García, R., Rubiera, F., & Pevida, C. (2019). Assessing the influence of biomass properties on the gasification process using multivariate data analysis. *Energy Conversion and Management*, 184, 649–660. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2019.01.093>

Grupo AVEVA. (2020). *AVEVA PRO/II Simulation – The Trusted Steady-State Process Simulator*. <https://www.aveva.com/en/products/pro-ii-simulation/>

Guerrero, A. B., Ballesteros, I., & Ballesteros, M. (2017). Optimal conditions of acid-catalysed steam explosion pretreatment of banana lignocellulosic biomass for fermentable sugar production. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 92(9), 2351–2359. <https://doi.org/10.1002/JCTB.5239>

- Heidari, M., Norouzi, O., Salaudeen, S., Acharya, B., & Dutta, A. (2019). Prediction of Hydrothermal Carbonization with Respect to the Biomass Components and Severity Factor. *Energy and Fuels*, 33(10). <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b02291>
- Higman, C. (2008). Gasification. In *Combustion Engineering Issues for Solid Fuel Systems*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-373611-6.00011-2>
- Hisham A. Maddah. (2016). Polypropylene as a Promising Plastic: A Review. *American Journal of Polymer Science*. <https://doi.org/10.5923/j.ajps.20160601.01>
- Huerta, K. (2019). Caracterización de una unidad productiva de cacao (*Theobroma cacao*) en Satipo, Perú. *Universidad Científica Del Sur. Facultad de Ciencias Ambientales. Ingeniería Ambiental.*, 1–126. <https://repositorio.cientifica.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12805/965/TB-BaqueA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Kargarzadeh, H., Mariano, M., Gopakumar, D., Ahmad, I., Thomas, S., Dufresne, A., Huang, J., & Lin, N. (2018). Advances in cellulose nanomaterials. *Cellulose*, 25(4), 2151–2189. <https://doi.org/10.1007/S10570-018-1723-5>
- Kausar, A. (2018). A review of filled and pristine polycarbonate blends and their applications. *Journal of Plastic Film and Sheeting*, 34(1), 60–97. <https://doi.org/10.1177/8756087917691088>
- Koshti, R., Mehta, L., & Samarth, N. (2018). Biological Recycling of Polyethylene Terephthalate: A Mini-Review. *Journal of Polymers and the Environment*, 26(8), 3520–3529. <https://doi.org/10.1007/S10924-018-1214-7>
- Kumar, A., & Gupta, R. K. (2018). Fundamentals of Polymer Engineering. In *Fundamentals of Polymer Engineering*. <https://doi.org/10.1201/9780429398506>
- Lettieri, P., & Al-Salem, S. M. (2011). Thermochemical Treatment of Plastic Solid Waste. *Waste*, 233–242. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-381475-3.10017-8>

- Lieberman, R. B. (2000). Polypropylene. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*. <https://doi.org/10.1002/0471238961.1615122512090502.A01>
- Li-Na, J. (2013). Study on preparation process and properties of polyethylene terephthalate (pet). *Applied Mechanics and Materials*, 312, 406–410.  
<https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMM.312.406>
- Liu, X., Burra, K. R. G., Wang, Z., Li, J., Che, D., & Gupta, A. K. (2021). Towards enhanced understanding of synergistic effects in co-pyrolysis of pinewood and polycarbonate. *Applied Energy*, 289. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2021.116662>
- Magalhães, A. I., de Carvalho, J. C., de Melo Pereira, G. V., Karp, S. G., Câmara, M. C., Medina, J. D. C., & Soccol, C. R. (2019). Lignocellulosic biomass from agro-industrial residues in South America: current developments and perspectives. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 13(6), 1505–1519. <https://doi.org/10.1002/BBB.2048>
- Maity, S. K. (2015). Opportunities, recent trends and challenges of integrated biorefinery: Part i. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 1427–1445.  
<https://doi.org/10.1016/J.RSER.2014.11.092>
- McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*, 83(1), 37–46. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00118-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00118-3)
- Meza-Sepúlveda, D. C., Castro, A. M., Zamora, A., Arboleda, J. W., Gallego, A. M., & Camargo-Rodríguez, A. v. (2021). Bio-based value chains potential in the management of cacao pod waste in colombia, a case study. *Agronomy*, 11(4).  
<https://doi.org/10.3390/AGRONOMY11040693>
- Morawetz, H. (2014). History of Polymer Science. *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*, 1–30. <https://doi.org/10.1002/0471440264.PST631>

- Muneer, F., Rasul, I., Azeem, F., Siddique, M. H., Zubair, M., & Nadeem, H. (2020). Microbial Polyhydroxyalkanoates (PHAs): Efficient Replacement of Synthetic Polymers. In *Journal of Polymers and the Environment* (Vol. 28, Issue 9).  
<https://doi.org/10.1007/s10924-020-01772-1>
- OECD. (2022, February 22). *Plastic pollution is growing relentlessly as waste management and recycling fall short, says OECD*. <https://www.oecd.org/newsroom/plastic-pollution-is-growing-relentlessly-as-waste-management-and-recycling-fall-short.htm>
- Okunola A, A., Kehinde I, O., Oluwaseun, A., & Olufiropo E, A. (2019). Public and Environmental Health Effects of Plastic Wastes Disposal: A Review. *Journal of Toxicology and Risk Assessment*, 5(2). <https://doi.org/10.23937/2572-4061.1510021>
- Özsin, G., & Pütün, A. E. (2018). A comparative study on co-pyrolysis of lignocellulosic biomass with polyethylene terephthalate, polystyrene, and polyvinyl chloride: Synergistic effects and product characteristics. *Journal of Cleaner Production*, 205, 1127–1138. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.09.134>
- Pauly, M., Gille, S., Liu, L., Mansoori, N., de Souza, A., Schultink, A., & Xiong, G. (2013). Hemicellulose biosynthesis. *Planta*, 238(4), 627–642. <https://doi.org/10.1007/S00425-013-1921-1>
- Peña, C., Bermúdez, E., Morales, S., & Farrés, A. (2018). Las cutinasas como una herramienta valiosa para la descontaminación de residuos plásticos. *Tab.*, 42(November 2019), 24–35. <http://tab.facmed.unam.mx>
- Pino, A. L., & Ocampo, E. M. (2020). *Química Verde: Enfoque sistémico* (1era ed.). Ediciones UNL, 2020.  
[https://bibliotecavirtual.unl.edu.ar:8443/bitstream/handle/11185/5630/PINO-química verde\\_DIGITAL.pdf](https://bibliotecavirtual.unl.edu.ar:8443/bitstream/handle/11185/5630/PINO-química_verde_DIGITAL.pdf)

- Ponce, J., Andrade, J. G. da S., dos Santos, L. N., Bulla, M. K., Barros, B. C. B., Favaro, S. L., Hioka, N., Caetano, W., & Batistela, V. R. (2021). Alkali pretreated sugarcane bagasse, rice husk and corn husk wastes as lignocellulosic biosorbents for dyes. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 2, 100061. <https://doi.org/10.1016/J.CARPTA.2021.100061>
- Popp, J., Kovács, S., Oláh, J., Divéki, Z., & Balázs, E. (2021). Bioeconomy: Biomass and biomass-based energy supply and demand. *New Biotechnology*, 60, 76–84. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2020.10.004>
- Portilla-Jiménez, J. G. (2022). Análisis del Marco Normativo de Economía Circular en Ecuador Orientado al Sector de los Plásticos. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 13(1). <https://doi.org/10.29166/revfig.v13i1.3364>
- Posso, F., Siguencia, J., & Narváez, R. (2020). Residual biomass-based hydrogen production: Potential and possible uses in Ecuador. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(26). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.09.235>
- Quintero, L., & Torres, C. (2019). Vista de Análisis de residuos sólidos de palma africana, como alternativa de aprovechamiento de energías renovables en el departamento del Cesar. *Ingenierías USBMed*, 10(1), 8–18. <https://doi.org/10.21500/20275846.3662>
- Quoc, dinh, Van, N., Hoang, P., & Son, V. (2019). Thermogravimetric study on rice, corn and sugar cane crop residue. *Journal of Sustainable Energy & Environment*, 6, 87–91. <https://www.jseejournal.com/media/190/attachment/Thermogravimetric%20Study%20on%20pp.87-91.pdf>
- Rahman, M. H., Bhoi, P. R., Saha, A., Patil, V., & Adhikari, S. (2021). Thermo-catalytic co-pyrolysis of biomass and high-density polyethylene for improving the yield and quality of pyrolysis liquid. *Energy*, 225. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2021.120231>

- Ralph, J., Lapierre, C., & Boerjan, W. (2019). Lignin structure and its engineering. *Current Opinion in Biotechnology*, 56, 240–249. <https://doi.org/10.1016/J.COPBIO.2019.02.019>
- Ronca, S. (2017). Polyethylene. *Brydson's Plastics Materials: Eighth Edition*, 247–278. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-35824-8.00010-4>
- Saha, B. C. (2003). Hemicellulose bioconversion. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 30(5), 279–291. <https://doi.org/10.1007/S10295-003-0049-X>
- Sajdak, M., & Muzyka, R. (2014). Use of plastic waste as a fuel in the co-pyrolysis of biomass. Part I: The effect of the addition of plastic waste on the process and products. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 107, 267–275. <https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2014.03.011>
- Sánchez-Calderón, I., Bernardo, V., Martín-de-León, J., & Rodríguez-Pérez, M. Á. (2021). Novel approach based on autoclave bead foaming to produce expanded polycarbonate (EPC) bead foams with microcellular structure and controlled crystallinity. *Materials & Design*, 212, 110200. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2021.110200>
- Santos, E., de Castro, M., Simões, C., Corradi, B., Vireira, M., & Oliveira, A. (2019). Torrefied briquettes of sugar cane bagasse and eucalyptus. *Revista Árvore*, 43(1), 1–9. <https://doi.org/10.1590/1806-90882019000100001>
- SENAE. (2022). *Importaciones – Servicio Nacional de Aduana del Ecuador*. <https://www.aduana.gob.ec/importaciones/>
- Shariff, A., Syairah, N., Aziz, M., & Abdullah, N. (2014). Slow pyrolysis of oil palm empty fruit bunches for biochar production and characterisation. *Journal of Physical Science*, 25(2), 97–112.
- Sikdar, S., Siddaiah, A., & Menezes, P. L. (2020). Conversion of waste plastic to oils for tribological applications. *Lubricants*, 8(8). <https://doi.org/10.3390/LUBRICANTS8080078>

- Solis, M., & Silveira, S. (2020). Technologies for chemical recycling of household plastics – A technical review and TRL assessment. *Waste Management*, 105, 128–138.  
<https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2020.01.038>
- Soltys, L., Olkhovyy, O., Tatarchuk, T., & Naushad, M. (2021). Green Synthesis of Metal and Metal Oxide Nanoparticles: Principles of Green Chemistry and Raw Materials. *Magnetochemistry 2021*, Vol. 7, Page 145, 7(11), 145.  
<https://doi.org/10.3390/MAGNETOCHEMISTRY7110145>
- Speight, J. G. (2017). Industrial Organic Chemistry. In *Environmental Organic Chemistry for Engineers*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-804492-6.00003-4>
- Susanti, R. F., Alvin, S., & Kim, J. (2020). Toward high-performance hard carbon as an anode for sodium-ion batteries: Demineralization of biomass as a critical step. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 91, 317–329.  
<https://doi.org/10.1016/J.JIEC.2020.08.016>
- Tumuluru, J. S., Sokhansanj, S., Wright, C. T., Boardman, R. D., & Yancey, N. A. (2011). A review on biomass classification and composition, co-firing issues and pretreatment methods. *American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting 2011, ASABE 2011*, 3. <https://doi.org/10.13031/2013.37191>
- Tursi, A. (2019). A review on biomass: Importance, chemistry, classification, and conversion. In *Biofuel Research Journal* (Vol. 6, Issue 2, pp. 962–979). Green Wave Publishing of Canada. <https://doi.org/10.18331/BRJ2019.6.2.3>
- Uddin, M. N., Techato, K., Taweekun, J., Rahman, M. M., Rasul, M. G., Mahlia, T. M. I., & Ashrafur, S. M. (2018). An overview of recent developments in biomass pyrolysis technologies. In *Energies* (Vol. 11, Issue 11). <https://doi.org/10.3390/en11113115>



- Vanholme, R., Demedts, B., Morreel, K., Ralph, J., & Boerjan, W. (2010). Lignin biosynthesis and structure. *Plant Physiology*, *153*(3), 895–905.  
<https://doi.org/10.1104/PP.110.155119>
- Vassilev, S. v., Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, *89*(5), 913–933.  
<https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2009.10.022>
- Wang, D., Shen, F., Yang, G., Zhang, Y., Deng, S., Zhang, J., Zeng, Y., Luo, T., & Mei, Z. (2018). Can hydrothermal pretreatment improve anaerobic digestion for biogas from lignocellulosic biomass? *Bioresource Technology*, *249*, 117–124.  
<https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2017.09.197>
- Wertz, J.-L., Bédué, O., & Mercier, J. P. (2010). *Cellulose Science and Technology*. EPFL Press.  
[https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=XI4nfkRyfGQC&oi=fnd&pg=PP23&dq=definition+of+cellulose&ots=aSLAh\\_O5iC&sig=oR-OoTXaBgxJYZ40PtoXdDHt9b0&redir\\_esc=y#v=onepage&q=definition%20of%20cellulose&f=false](https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=XI4nfkRyfGQC&oi=fnd&pg=PP23&dq=definition+of+cellulose&ots=aSLAh_O5iC&sig=oR-OoTXaBgxJYZ40PtoXdDHt9b0&redir_esc=y#v=onepage&q=definition%20of%20cellulose&f=false)
- Williams, P. T. (2021). Hydrogen and Carbon Nanotubes from Pyrolysis-Catalysis of Waste Plastics: A Review. In *Waste and Biomass Valorization* (Vol. 12, Issue 1).  
<https://doi.org/10.1007/s12649-020-01054-w>
- Xin, J., Zhang, Q., Huang, J., Huang, R., Jaffery, Q. Z., Yan, D., Zhou, Q., Xu, J., & Lu, X. (2021). Progress in the catalytic glycolysis of polyethylene terephthalate. *Journal of Environmental Management*, *296*. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2021.113267>
- Yang, J., Rizkiana, J., Widayatno, W. B., Karnjanakom, S., Kaewpanha, M., Hao, X., Abudula, A., & Guan, G. (2016). Fast co-pyrolysis of low density polyethylene and biomass residue for oil production. *Energy Conversion and Management*, *120*, 422–429. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2016.05.008>

Zhang, F., Zhao, Y., Wang, D., Yan, M., Zhang, J., Zhang, P., Ding, T., Chen, L., & Chen, C. (2021). Current technologies for plastic waste treatment: A review. *Journal of Cleaner Production*, 282. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.124523>

Zinla, D., Gbaha, P., Koffi, P. M. E., & Koua, B. K. (2021). Characterization of rice, coffee and cocoa crops residues as fuel of thermal power plant in Côte d'Ivoire. *Fuel*, 283. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2020.119250>

**Anexos**