



PROPUESTA DE PROCESO VERDE  
APLICADO AL APROVECHAMIENTO  
DE RESIDUOS Y TRANSFORMACIÓN  
DE MICROPLÁSTICOS

**Jenny Catalina Medina Monroy**

Universidad EAN  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ingeniería de Procesos  
Bogotá, Colombia  
2021

# PROPUESTA DE PROCESO VERDE APLICADO AL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS Y TRANSFORMACIÓN DE MICROPLÁSTICOS

**Jenny Catalina Medina Monroy**

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

**Magister en Ingeniería de Procesos**

**Director:**

**Prof. Dr. Jeffrey León Pulido**

**Modalidad:**

Trabajo Dirigido

Universidad EAN

Facultad de Administración y Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería de Procesos

Bogotá, Colombia

2021

## Nota de aceptación

---

---

---

---

---

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del director del trabajo de grado

Bogotá D.C.

## Resumen

La disposición inadecuada de residuos plásticos ha conducido a la contaminación del medio ambiente, incluidos ecosistemas marinos, fuentes de agua dulce, el suelo entre otros. En consecuencia, se estima que entre 0,8 y 2,7 millones de toneladas métricas de plástico por año llegan a los océanos y que actualmente 5 billones de piezas de plástico contaminan el océano. Parte de estos desechos se pueden encontrar en forma de microplásticos (MP), partículas con tamaño inferior a 5 mm, creadas con este tamaño para fines específicos o que se forman como resultado de la acción del medio ambiente o la descomposición durante el uso. Como agravante, los lodos procesados en plantas de tratamiento de aguas residuales, ricos en microplásticos, son una fuente importante de fertilizantes para cultivos, esto último convierte a los MP en un factor crítico que puede llegar a afectar la seguridad alimentaria. El presente proyecto estima la cantidad de MP presente en playas de Colombia, teniendo en cuenta que el país posee costas sobre dos océanos, los datos de muestreo revelan comportamientos interesantes, pues los MP se encuentran en mayor cantidad en las costas del Atlántico. Calculando el MP presente en 126 playas, se obtiene una cantidad aproximada de 49 Toneladas. En consecuencia, a partir de la cantidad de potencial de MP fue planteado un proceso de aprovechamiento y recuperación, estableciendo un análisis de viabilidad técnica y financiera, finalmente con la aplicación de conceptos de química verde se genera el proceso verde para el aprovechamiento y transformación de MP.

### **Palabras clave:**

Procesos verdes, microplástico, residuo, aprovechamiento, simulación asistida por computador.

## Abstract

The improper disposal of plastic waste has led to the contamination of the environment, including marine ecosystems, fresh water sources, the soil among others. Consequently, it is estimated that between 0.8 and 2.7 million metric tons of plastic per year reach the oceans and that currently 5 trillion pieces of plastic pollute the ocean. Some of these wastes can be found in the form of microplastics (MP), particles smaller than 5 mm, created with this size for specific purposes or that are formed as a result of the action of the environment or decomposition during use. As an aggravating factor, the sludge processed in wastewater treatment plants, rich in microplastics, is an important source of fertilizers for crops, the latter makes MP a critical factor that can affect food security. This project estimates the amount of MP present on Colombian beaches, taking into account that the country has coasts on two oceans, the sampling data reveal interesting behaviors, since MP are found in greater quantity on the Atlantic coasts. Calculating the MP present in 126 beaches, an approximate amount of 49 Tons is obtained. Consequently, based on the amount of MP potential, a process of use and recovery was proposed, establishing an analysis of technical and financial feasibility, finally with the application of green chemistry concepts, the green process is generated for the use and transformation of MP.

### Keywords:

Green processes, microplastic, waste, utilization, computer-assisted simulation.

# Tabla de Contenido

	<b>Pág.</b>
Lista de figuras	9
Lista de tablas	10
Lista de abreviaturas	11
<b>TABLA DE CONTENIDO.....</b>	<b>6</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN Y ESTRUCTURA DEL PROYECTO .....</b>	<b>12</b>
1.1 INTRODUCCIÓN .....	12
1.2 OBJETIVOS.....	15
1.2.1 General .....	15
1.2.2 Específicos .....	15
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	16
1.4 DELIMITACIÓN Y ALCANCE.....	19
1.5 ESTRUCTURA DEL PROYECTO .....	20
<b>2 REVISIÓN DE LA LITERATURA.....</b>	<b>22</b>
2.1 EL PLÁSTICO.....	22
2.1.1 Ciclo de vida de los materiales poliméricos .....	23
2.2 PROPIEDADES DEL PLÁSTICO .....	24
2.2.1 Propiedades físicas del plástico .....	24
2.2.2 Propiedades químicas del plástico .....	26
2.2.3 Propiedades térmicas del plástico .....	26
2.3 RESIDUOS PLÁSTICOS CONTEXTO MUNDIAL Y NACIONAL.....	27
2.4 MICROPLÁSTICO .....	31
2.4.1 Orígenes del Microplástico .....	32
2.4.2 Contexto Mundial y Nacional .....	32
2.4.3 Tipos de microplásticos .....	37
2.4.3.1 Composición química.....	37

2.4.3.2 Estado sólido .....	38
2.4.3.3 Solubilidad .....	38
2.4.3.4 Tamaño.....	39
2.4.3.5 Forma y estructura.....	39
2.4.3.6 Color.....	39
2.4.3.7 Origen.....	40
2.5 PROCESOS PARA LA RECUPERACIÓN DEL PLÁSTICO .....	40
2.5.1 Reciclaje mecánico .....	43
2.5.2 Reciclaje químico .....	45
2.5.3 Reciclaje térmico o de recuperación de energía .....	46
2.5.4 Degradación de polímeros .....	47
2.6 PROCESOS PARA LA RECUPERACIÓN DE MICROPLÁSTICOS.....	49
2.6.1 Fotodegradación .....	49
2.6.2 Bioreactor de membrana .....	51
2.6.3 Degradación bacteriana .....	52
2.6.4 Eliminación por medios físicos o mecánicos .....	53
2.6.5 Métodos químicos .....	53
2.6.6 Degradación por procesos catalíticos.....	54
2.7 COMPOSICIÓN DEL MICROPLÁSTICO .....	57
2.8 PROCESOS VERDES APLICADOS A MICROPLÁSTICOS.....	58
2.8.1 Biorreactor de membrana .....	61
2.8.2 Membrana de filtración .....	61
2.8.3 Oxidación por aire húmedo.....	62
2.8.4 Polimerización enzimática.....	62
2.9 PROCESOS VERDES EN TORNO AL AGUA Y LA ENERGÍA .....	64
2.10 NORMATIVAS NACIONALES E INTERNACIONALES .....	67

2.11 CONCLUSIONES PRELIMINARES.....	71
<b>3 METODOLOGÍA.....</b>	<b>73</b>
3.1 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA.....	73
3.2 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES DE PROCESO Y DATOS.....	75
3.3 TRATAMIENTO DE DATOS.....	79
3.4 CONCLUSIÓN PRELIMINAR.....	84
<b>4 RESULTADOS .....</b>	<b>86</b>
4.1 DISEÑO BÁSICO PARA EL PROCESO DE APROVECHAMIENTO DE MICROPLÁSTICOS DE PLAYAS .....	86
4.1.1 Viabilidad técnica .....	86
4.1.2 Viabilidad financiera .....	92
4.1.2.1 Análisis escenario 1, precio de venta mínimo.....	94
4.1.2.2 Análisis escenario 2, precio promedio de venta.....	96
4.1.2.3 Análisis escenario 3, precio promedio de venta justo .....	97
4.2 PROPUESTA DE PROCESO VERDE.....	99
4.3 PLAN DE INTERVENCIÓN .....	101
4.4 ESTUDIOS FUTUROS .....	103
4.5 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO .....	103
<b>5 CONCLUSIONES GENERALES .....</b>	<b>105</b>
<b>6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>108</b>

## Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1: Estructura del proyecto.....	21
Figura 2: Pasos en el proceso de reciclaje mecánico .....	44
Figura 3: Metodología.....	74
Figura 4: Medición de área con geoposicionamiento global en Google Earth .....	80
Figura 5: Construcciones en la playa en Coveñas .....	81
Figura 6: Propuesta de diseño conceptual del proceso de aprovechamiento y transformación de microplásticos .....	86
Figura 7: Gráfica operación unitaria de lavado.....	87
Figura 8: Gráfica operación unitaria de secado .....	88
Figura 9: Gráfica operación unitaria de trituración.....	89
Figura 10: Gráfica operación unitaria de extrusión .....	90
Figura 11: Gráfica operación unitaria de peletizado.....	91
Figura 12: Punto de equilibrio escenario 1, precio mínimo de venta .....	95
Figura 13: Punto de equilibrio escenario 2, precio promedio de venta .....	97
Figura 14: Punto de equilibrio escenario 3, precio justo de venta .....	98
Figura 15: Gráfica operación unitaria de lavado para el proceso verde .....	99
Figura 16: Gráfica operación unitaria de secado para el proceso verde .....	100

## Lista de tablas

	<u>Pág.</u>
Tabla 1: Principales usos de acuerdo con el código de identificación de resinas.....	29
Tabla 2: Distribución de las formas de microplástico halladas en las costas del Caribe y Pacífico colombiano.....	36
Tabla 3: Distribución de las formas de microplástico halladas en las costas del Caribe y Pacífico colombiano con relación al tipo de polímero.....	36
Tabla 4: Clasificación de residuos plásticos .....	41
Tabla 5: Mecanismos de biodegradación.....	48
Tabla 6: Catalizadores empleados en la degradación de microplásticos .....	55
Tabla 7: Caracterización de los microplásticos presentes en afluentes y efluentes de las PTAR .....	57
Tabla 8: Normatividad Nacional en manejo de residuos, reglamentación de reciclaje, prevención y manejo de la contaminación marina.....	68
Tabla 9: Normatividad Internacional para la protección de los océanos y conservación del medio marino .....	70
Tabla 10: Detalle playas de estudio investigación 1 .....	76
Tabla 11: Forma de los MP hallados en 43 playas de estudio .....	77
Tabla 12: Caracterización de los MP hallados en 43 playas de estudio según el tipo de polímero .....	78
Tabla 13: Datos base para calcular la cantidad estimada de MP disponible en 126 playas de arena de Colombia .....	82
Tabla 14: Cantidad potencial de MP estimado para escenario 1 .....	83
Tabla 15: Cantidad potencial de MP estimado para escenario 2 .....	83
Tabla 16: Cantidad potencial de MP estimado para escenario 3 .....	84
Tabla 17: Información inicial para el análisis financiero.....	93
Tabla 18: Precios de venta de PE por Kg en forma de pellet .....	94
Tabla 19: Comparativo entre el proceso inicial y el proceso verde .....	100

## Lista de abreviaturas

ABS	Acrilonitrilo butadieno estireno
BM	Bioreactor de membrana
HIPS	Poliestireno de alto impacto
IoT	Internet de las cosas
MP	Microplástico
MT	Millones de toneladas
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
ONU	Organización de las Naciones Unidas
PA	Poliamida
P-C	Post-consumo
PE	Poliétileno
PEAD/HDPE	Poliétileno de alta densidad
PEBD/LDPE	Poliétileno de baja densidad
PES	Poliéster
PET	Poliétileno tereftalato
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PTAR	Planta de tratamiento de agua residual
PU	Poliuretano
PVA	Acetato de polivinilo
PVC	Policloruro de vinilo
RP	Residuos plásticos
RPMG	Residuos plásticos mal gestionados

## 1 INTRODUCCIÓN Y ESTRUCTURA DEL PROYECTO

### 1.1 Introducción

La mala disposición de los residuos plásticos ha conducido a la contaminación del medio ambiente, incluidos ecosistemas marinos, fuentes de agua dulce y el suelo. Estudios desarrollados a nivel mundial, concluyen que aproximadamente 5,25 billones de partículas de desechos plásticos flotan en los océanos, lo que es equivalente a 268.940 toneladas (Avio et al. 2017). Parte de estos desechos se pueden encontrar en forma de microplásticos (MP), partículas con tamaño inferior a 5 mm, creadas para múltiples propósitos con este tamaño o que se originan a partir de la degradación de piezas de tamaño mayor. Se ha reportado la presencia de MP en océanos abiertos, incluidas las aguas polares, los mares marginales y las aguas costeras (Isobe et al., 2019).

Estimaciones hechas en 2014 calculan un estimado de 4,85 billones de partículas de MP presentes en el océano (Eriksen et al., 2014), estudios más recientes estiman que el nivel de MP en diferentes ecosistemas costeros y marinos oscila entre 0,001 y 140 partículas por m<sup>3</sup> en agua y de 0,2 a 8766 partículas por m<sup>3</sup> en sedimentos en diferentes ambientes acuáticos en todo el mundo (Thushari & Senevirathna, 2020). En los estudios realizados en las costas del Atlántico y del Pacífico en Colombia, se ha encontrado presencia de MP en todas las muestras recolectadas, con concentraciones que llegan a las 1.387 piezas por cada m<sup>2</sup> (Garcés-Ordóñez et al., 2020), esto muestra una alta contaminación e impactos en ecosistemas sensibles como los manglares y playas, un deterioro significativo en el paisaje y afectación a las personas, ya que parte de estos MPs son ingeridos por peces u otros animales que hacen parte de la dieta humana, así como la sal de mesa en donde estudios recientes identifican que el 92% de las muestras analizadas a nivel mundial contienen partículas de MP (Lee et al., 2021).

Otros contaminantes dañinos para el ser humano como metales pesados, químicos farmacéuticos o pesticidas se adhieren fácilmente a los MP lo que facilita su transporte ya

sea por medios acuáticos o por el aire, de esta forma los MP afectan directa e indirectamente la salud humana cuando ingresan al sistema digestivo, respiratorio o circulatorio de las personas. Según un estudio reciente que analiza la cantidad de MP ingeridos por las personas, esta cifra está entre los 11.845 y 193.200 partículas de MP por persona al año, siendo la principal fuente el agua potable (Senathirajah et al., 2021).

La propagación de los MP ha llegado a los arrecifes de coral, que son unos de los ecosistemas más biodiversos del planeta y de los cuáles subsisten millones de personas. Los corales están ingiriendo MP debido a que el lixiviado plástico funciona como fagoestimulante, incluso algunos tipos de coral prefieren el MP sobre su dieta natural por la falsa percepción de saciedad, pues los MP pueden permanecer por días al interior del coral, lo que influye en el deterioro de su salud (Huang, Chen, et al., 2020).

También se han detectado MP en suelos agrícolas, agua potable y productos de acuicultura. Mucha evidencia sugiere que los MP podrían afectar la calidad del suelo al perturbar los organismos nativos, así la contaminación por MP afecta tanto en la agricultura vegetal por la reducción de la calidad del suelo, como en la animal la acumulación en los ecosistemas y la reducción de la fecundidad (Zurier & Goddard, 2021), todo esto afectando el futuro de la seguridad alimentaria.

Estos hechos han despertado el interés en los últimos años por reducir la producción y recuperar y aprovechar los MP que ya se encuentran en el ambiente. Existen múltiples iniciativas a nivel mundial para la recuperación del MP presentes en agua de mar, sedimentos marinos, sales para consumo humano, sedimentos de lagos, compost, suelos, plantas de tratamiento de aguas residuales y arena de playa (Besley et al., 2017; Cashman et al., 2020; Scopetani et al., 2020; Sol et al., 2020; Yaranal et al., 2020; Zobkov et al., 2020), algunos de estos procesos aún son experimentales y su implementación no está ampliamente difundida. En cuanto a la reutilización y aprovechamiento del MP están surgiendo los primeros procesos que ya están siendo empleados, por ejemplo, el método de procesamiento mecánico y remezclado con resinas vírgenes que implica el triturado

mecánico o la extrusión térmica de residuos plásticos y la posterior mezcla con polímero sin usar, este método es usado en algunas empresas de refrescos que utilizan botellas con mayores cantidades de plástico reciclado.

Otra estrategia es la despolimerización del MP a los monómeros originales que se efectúa con el uso de disolventes, los nuevos monómeros podrían polimerizarse para formar nuevos polímeros como los poliuretanos (Hou et al., 2021), otro proceso generado en China, consiste en la utilización del MP recuperado, principalmente polietileno de alta densidad con tamaños entre 1 y 4 mm, como partículas portadoras en un biorreactor de lecho fluidizado para la eliminación simultánea de carbono y nitrógeno de las aguas residuales sépticas (He et al., 2019).

Estos ejemplos de procesos para la recuperación y aprovechamiento de MP indican que tratar el fenómeno de contaminación por MP es posible, en Colombia hasta el momento se han hecho estudios de identificación y cuantificación de la presencia de MP en diferentes medios (Garcés-Ordóñez et al., 2020; Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives De Andrés” - INVEMAR, 2017), pero su recuperación y potencial reutilización es una oportunidad que aún no se ha explotado.

Teniendo como base esta problemática en torno a la generación y propagación de MP y en concordancia con los principios de la Universidad Ean que se acoge a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y postula su Manifiesto de emprendimiento sostenible como base fundamental para la formación integral de sus estudiantes, así como también concibe el desarrollo como un proceso equilibrado en los aspectos ambientales, económicos y sociales (Universidad Ean, 2014), se plantea realizar un estudio técnico-económico para un proceso de aprovechamiento y transformación de MP con el propósito de aportar al logro de los ODS a nivel local, nacional y mundial, y contribuir de esta forma a satisfacer las necesidades actuales sin comprometer el bienestar de las generaciones futuras.

El estudio contempla una revisión de la literatura en cuanto a las nociones básicas sobre polímeros, sus principales características, los diferentes tipos de residuos poliméricos, entre ellos los microplásticos y las técnicas empleadas para su aprovechamiento y transformación, así como de los métodos de análisis técnico y económico por medio de los cuales se estudiará el proceso, todo esto, teniendo en cuenta la casuística local de los desechos microplásticos en las costas colombianas.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 General**

Desarrollar un estudio técnico-económico y propuesta de proceso de aprovechamiento de residuos poliméricos-micropásticos aplicando conceptos verdes.

### **1.2.2 Específicos**

- Analizar los procesos de aprovechamiento de residuos poliméricos y data disponible de presencia de microplásticos en Colombia y el mundo.
- Realizar un estudio técnico para la cuantificación de microplástico, que permita entender las características y aplicar métodos para la identificación de microplástico.
- Evaluar los procesos convencionales empleados para la recuperación de plásticos-microplástico que permitan evaluar de manera técnica los procesos de aprovechamiento y selección del más viable a partir de una evaluación de sostenibilidad.
- Plantear un diseño de proceso de aprovechamiento de polímeros-microplásticos incluyendo conceptos verdes para su transformación en componentes con valor agregado.
- Desarrollar una evaluación económica del proceso seleccionado incluyendo conceptos verdes.

### 1.3 Justificación

La industrialización, el crecimiento de la población y el consumismo han incrementado la producción de los denominados residuos poliméricos o residuos plásticos (RP) debido a la creación de productos manufacturados y de un solo uso (Fundación Centro de Recursos Ambientales de Navarra, 2014). Estos RP provienen de productos fabricados a base de petróleo y requieren un manejo adecuado para su disposición de tal forma que no afecten la salud del ser humano ni su medio ambiente (Sáez & Urdaneta G., 2014). Se estima que anualmente entre 1,15 y 2,41 millones de toneladas (MT) de plástico fluyen por los ríos hacia el océano y los 120 ríos más contaminantes contribuyeron con el 90% de la carga plástica que llega al océano, de éstos, 103 ríos están ubicados en Asia, ocho en África, ocho en América del Sur y Central, y uno en Europa (L. C. M. Lebreton et al., 2017).

Los RP se fragmentan por acción del medio ambiente o la descomposición durante el uso dando origen a los microplásticos (MP) que son partículas con tamaño menor a los 5 mm. Los MP anteriormente mencionados son conocidos como MP secundarios ya que se forman a partir de la degradación de una pieza de tamaño mayor, los MP primarios son partículas creadas intencionalmente con estos tamaños y se utilizan principalmente en productos cosméticos y de limpieza que se desechan a través de las aguas residuales (Welden & Lusher, 2020).

Los MP están ampliamente distribuidos por todo el planeta, incluso en lugares tan alejados como el ártico, esto debido a que su principal medio para el transporte es el agua y su presencia en medios acuáticos es de gran interés, ya que esto determina la movilidad, distribución y biodisponibilidad de los MP (Wang et al., 2021). Los primeros estudios sobre microplásticos se centraron en la contaminación marina, sin embargo, reciente se estableció que las aguas superficiales y subterráneas también están contaminadas. En gran medida la propagación actual de MP se ha originado en las aguas residuales, que generalmente no se tratan para eliminar contaminantes tan pequeños, incluso algunas comunidades utilizan los

efluentes provenientes de zonas urbanas para el riego agrícola, extendiendo aún más los MP en el suelo y los ecosistemas terrestres (Zurier & Goddard, 2021). Para agravar esto, los lodos procesados en plantas de tratamiento de aguas residuales, ricos en microplásticos, son una fuente importante de fertilizantes para cultivos, esto último convierte a los MP en un factor crítico que puede llegar a afectar la seguridad alimentaria (Akhtar et al., 2015).

Otra efecto importante generado por la propagación de MP en todos los medios es que el ser humano ya lo está consumiendo a través del agua potable, sal, azúcar, miel y alimentos provenientes del mar (Senathirajah et al., 2021), los estudios en torno a la afectación para el ser humano por la ingesta de MP aún no son concluyentes y no se conoce su impacto a largo plazo, lo que si se ha demostrado son las consecuencias que trae cuando la vía de ingreso de los MP a las personas es por las vías respiratorias, ya que puede causar respuestas inflamatorias e inmunitarias del pulmón e incluso cáncer (Huang, Song, et al., 2020), de acá la importancia de dar tratamiento oportuno a los MP, procurando su aprovechamiento y evitando así que continúe generando los impactos antes mencionados.

En vista del grave problema de contaminación generado por la gran cantidad de residuos MP que se presenta a nivel mundial, diversas organizaciones vienen diseñando planes y programas con el fin de controlar el problema y reducir su impacto, una de ellas es la Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2015) que en su agenda 2030 sobre los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible ODS, específicamente en su objetivo número 12, plantea garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles con metas específicas para reducir la generación de desechos mediante actividades de prevención, reducción, reciclado y reutilización (Moran, 2015).

Otras organizaciones como WWF, la Fundación Ellen MacArthur y Boston Consulting Group recomiendan una solución coordinada para resolver el problema de los plásticos de raíz, con un tratado internacional de carácter obligatorio para frenar la contaminación por residuos plásticos, en esta propuesta las tres organizaciones recomiendan a los países que hacen parte de la ONU adoptar el tratado debido a la urgencia de complementar la regulación

y las medidas existentes y acelerar el camino hacia la economía circular de los plásticos, el tratado establece objetivos globales y metas obligatorias, junto con planes de acción y medición, se espera que en la próxima conferencia de la ONU se presente una resolución para iniciar las negociaciones del tratado (WWF et al., 2020).

Por su parte en Colombia, el Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES 3918, 2018) estableció los lineamientos para la incorporación de los ODS en los Planes de Desarrollo Territoriales PDT para la vigencia 2016-2019, con el fin de cumplir con las metas de ODS para Colombia, en relación a nuestro caso de estudio, la meta 12.5 busca para el año 2030 reducir considerablemente la generación de desechos mediante actividades de prevención, reducción, reciclado y reutilización, teniendo como línea base para 2015 un valor de 8,6%, una meta inmediata para 2018 de 10% y una meta proyectada para 2030 de 17,9% de reducción en la generación de desechos (CONPES 3918, 2018), también se generó el Plan Nacional para la Gestión Sostenible de los Plásticos de un solo uso el cual propone 3 metas principales para 2030: (1) Que el 100% de los plásticos de un solo uso sean reutilizables, reciclables o compostables, (2) que por lo menos 30% de los plásticos de un solo uso sean efectivamente reciclados o compostados o aprovechados y (3) que los productos de plástico de un solo uso cuenten con un contenido promedio mínimo del 30% de material reciclado (Mesa Nacional para la Gestión Sostenible del Plástico, 2019).

Por otra parte, previendo el incremento anual en la generación de residuos plásticos, se formuló la Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos CONPES 3874, que incorpora el modelo de economía circular, el cual busca aumentar la eficiencia en el ciclo de producción y consumo, reduciendo el uso de los recursos y la producción de residuos, generando una continua reutilización (Comisión ODS Colombia, 2018).

Por otro lado, la materia prima base para la producción de polímeros, el petróleo, es un recurso finito, por lo tanto es indispensable para la fabricación de nuevos productos el aprovechamiento y transformación de los MP que abundan en las costas colombianas, de aquí se hace necesario establecer la presencia de MP en estas zonas lo que permitirá

determinar la cantidad y la distribución en el medio (Purca & Henostroza, 2017). Esto alineado con las acciones propuestas en el CONPES 2750 que establece el programa Mares Limpios y Costas Limpias, el cual busca a través del Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives de Andrés” (INVEMAR), la Armada Nacional, la Comisión Nacional de Oceanografía, el Instituto Alexander Von Humboldt, el IDEAM, la DIMAR, entre otros, llevar a cabo acciones de protección, recuperación y mejoramiento ambiental en las zonas costeras y en los terminales marítimos más contaminados.

Con el propósito ofrecer una propuesta para la mitigación de la problemática asociada a los MP, se plantea el desarrollo de un diseño teniendo como base conceptos verdes, para el aprovechamiento de los microplásticos para la generación de productos con valor agregado, de tal forma que aporte al cumplimiento con las metas de los ODS para el país y al objetivo principal de la Declaración sobre la Gestión Sostenible de los Plásticos, el cual es aunar esfuerzos para lograr una gestión sostenible de los plásticos a lo largo de su ciclo de vida, permitiendo una producción y consumo sostenible del mismo, y de esta forma prevenir los impactos negativos de los residuos de plástico y microplásticos sobre todos los ecosistemas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2019).

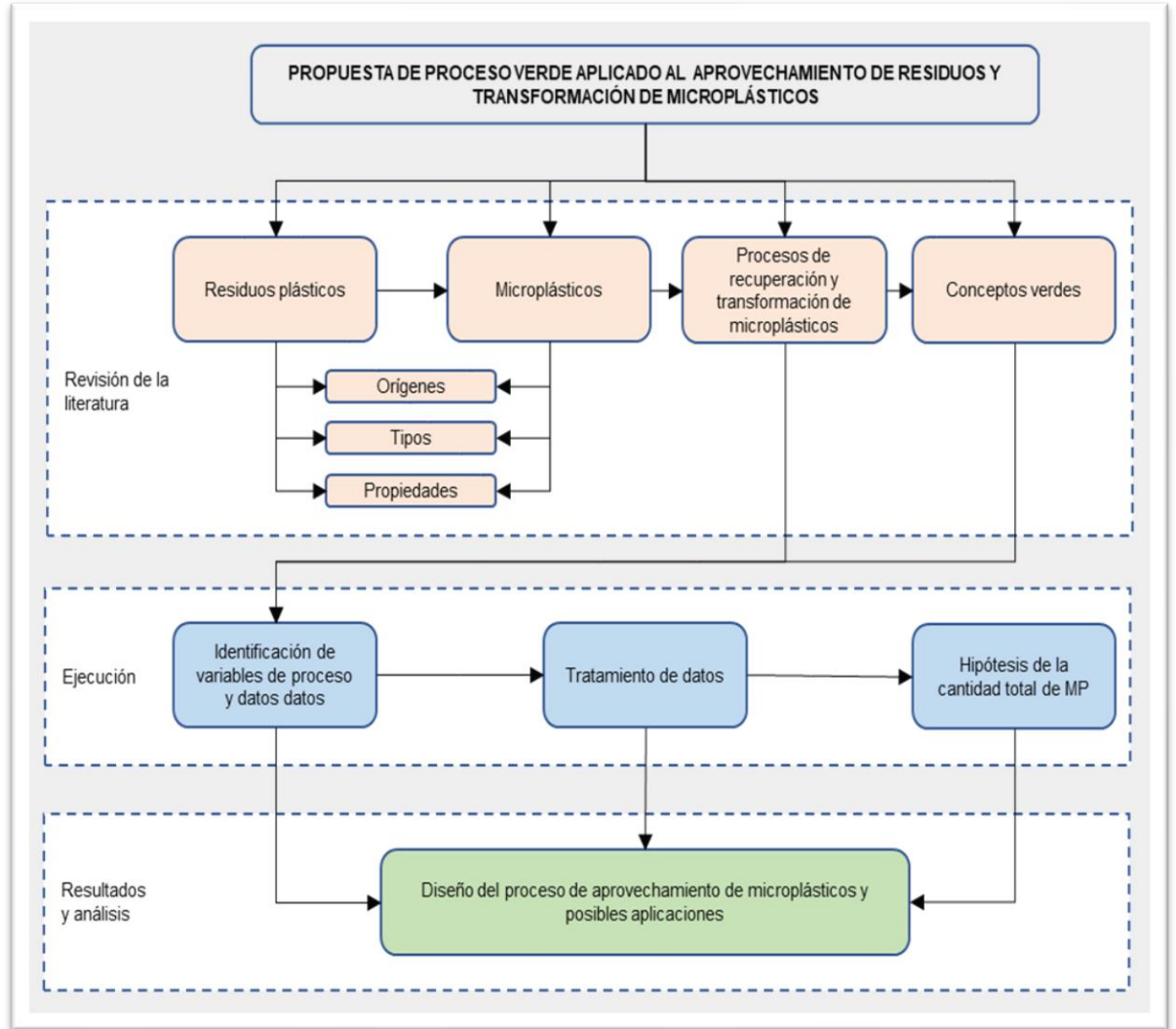
#### **1.4 Delimitación y alcance**

Para el desarrollo de este documento se tendrán en cuenta los datos presentas en la literatura referentes a 5 investigaciones publicadas en los últimos 3 años en relación a la cuantificación, caracterización e impactos de los microplásticos presentes en las costas colombianas y se hará un cálculo de la cantidad potencial estimada de MP presente en 126 playas del país, a partir de estos datos se planteará el proceso para el aprovechamiento y transformación de microplásticos el cual se simulará utilizando el software SuperPro Design®, al cual posteriormente se hará su evaluación financiera de sostenibilidad, finalizando con la propuesta de diseño del proceso verde aplicado al aprovechamiento de residuos y transformación de microplásticos.

## 1.5 Estructura del proyecto

El proyecto parte de la problemática presentada en la que se plantea la revisión documental y el desarrollo de este. Se divide tres secciones planteadas de la siguiente manera: en la primera sección se presenta la revisión de la literatura y el estado del arte del tema a tratar, partiendo de la generalidad de los residuos plásticos, luego de forma particular a los MP y los procesos asociados a su recuperación y transformación teniendo como base los conceptos verdes asociados, adicional a la investigación de normatividad nacional e internacional. En la segunda sección se aplicará la metodología para llevar a cabo extracción de los datos obtenidos en la revisión documental de investigaciones desarrolladas en las costas del pacífico y el caribe colombiano, cuya finalidad es la cuantificación y caracterización de los MP hallados, y con la medición de área de 126 playas de arena del país se plantea la cantidad potencial de MP a partir del cual se ejecutará el diseño del proceso. Finalmente, en la última sección se realiza el análisis de los datos, se exponen los resultados y se plantea la propuesta del diseño básico del proceso para la transformación de MP y su correspondiente análisis financiero, cerrando con la propuesta del proceso incluyendo principios de química verde, la estructura del proyecto se muestra en la figura 1.

Figura 1: Estructura del proyecto



Fuente: Elaboración propia

## 2 REVISIÓN DE LA LITERATURA

### 2.1 El plástico

Se conoce con el nombre de plástico a las grandes moléculas sintéticas que se forman al unir miles de pequeñas unidades moleculares conocidas como monómeros (Crawford & Martin, 2020). Un monómero es una molécula orgánica de bajo peso molecular que unida a otros monómeros por medio de enlaces químicos forma cadenas largas, comúnmente conocidas como polímeros (Young & Lovell, 2011).

Los polímeros son grandes moléculas formadas por unidades repetitivas, generalmente átomos de carbono que constituyen la base de la cadena polimérica; aunque existen polímeros de forma natural en plantas y animales como proteínas, almidón o caucho natural; también existen polímeros sintéticos que son creados por acción del hombre (Uribe & Mehrenberger, 2010), dentro de estos encontramos: (a) plásticos, como el poli-cloruro de vinilo (PVC) que se usa para fabricar mangueras y tuberías para la construcción, el polietileno (PE) y polipropileno (PP) se utilizan para producir varios tipos de contenedores y envases; (b) las fibras que son utilizadas en la industria textil y pueden ser producidas a partir de polímeros como el nylon o los poli-ésteres; (c) los elastómeros o hules tienen su aplicación en llantas, mangueras o suelas para calzado y (d) las pinturas también se componen de polímeros vinílicos, acrílicos, estirénicos, poliéster (PES) y epóxicos (López & Mendizábal, 2015).

Las macromoléculas que forman los polímeros están formadas por cientos o miles de monómeros que se repiten y se mantienen unidos mediante enlaces covalentes, cada molécula proviene de una molécula capaz de enlazarse a otras para formar una cadena, estas cadenas pueden tener o no ramificaciones y se pueden unir a otras mediante enlaces cruzados (González & Mancini, 2005). La estructura molecular hace referencia a la disposición de las moléculas en los polímeros, por lo que se clasifican en: lineales (termoplásticos), tridimensionales (termoestables) y lineales entrecruzados (elastómeros). (1) En los

polímeros lineales las cadenas están unidas entre sí por enlaces tan débiles que se rompen si el plástico se calienta (Fombuena et al., 2016). (2) Los polímeros tridimensionales tienen enlaces tan fuertes entre sus cadenas que no se rompen si el material se calienta. La estructura de estos polímeros adopta la forma de una red tridimensional de átomos, este tipo de estructura da origen a materiales de gran rigidez y fragilidad. (Pérez et al., 2005).

Las principales características de estos polímeros son: no se pueden fundir con aplicación de calor, mantienen sus propiedades a temperaturas elevadas, no son reciclables, sus procesos de transformación son complejos (Fombuena et al., 2016). (3) En los polímeros lineales entrecruzados su principal característica es la flexibilidad, si se aplica una fuerza a un elastómero las cadenas se estiran. (Fombuena et al., 2016). En los elastómeros su entropía está por encima de su entalpía, cuando el elastómero es estirado, afecta su entropía y se incrementa la entalpía (Pérez et al., 2005). Las principales características de los elastómeros son: buen comportamiento elástico, alta resistencia al desgaste y al desgarramiento, estabilidad térmica, no son reciclables, sus procesos de transformación son difíciles.

### **2.1.1 Ciclo de vida de los materiales poliméricos**

Las materias primas, ya sean vírgenes o recicladas, son transformados en productos a través de las diferentes técnicas de conversión, esta es la fase de inicio de la vida para el producto. Durante el proceso de fabricación, se genera el primer tipo de residuo plástico sólido post-industrial (P-I), que nunca llega al consumidor, estos pueden incluir residuos de producción, caídas de productos y recortes. (Ignatyev et al., 2014).

Al final de su vida útil, el producto se desecha y se convierte en residuo post-consumo (P-C), consisten de plásticos mezclados de composición desconocida y potencialmente contaminados por elementos orgánicos u otros polímeros, lo que hace que el flujo de reciclaje de plásticos P-C sea más complejo (Hubo et al., s/f). Lo que cierra el ciclo es el retorno del plástico como materia prima secundaria por medio de métodos mecánicos, químicos o térmicos (Ragaert et al., 2017).

## 2.2 Propiedades del plástico

Las propiedades de los polímeros se pueden clasificar en 3 categorías: físicas, químicas y térmicas, que se describen a continuación.

### 2.2.1 Propiedades físicas del plástico

Estas propiedades son medibles y observables y dependen fundamentalmente de la estructura del plástico (McKeen, 2020), como consecuencia de la evolución tecnológica los polímeros se han ido transformando logrando mejorar sus propiedades mecánicas como elasticidad, durabilidad y resistencia (Parres, 2005), estas propiedades son el resultado de su estructura molecular, el peso molecular, la tasa de cristalinidad, la aleación de polímeros, entre otros (Campo, 2008). Las propiedades físicas de un material se hacen evidentes cuando se ejerce sobre él una fuerza, esta deformación dependerá de su comportamiento mecánico, su geometría, la intensidad de la fuerza y su dirección (Grellmann & Seidler, 2013). Las propiedades físicas más importantes de los polímeros son:

- Apariencia. Son las características más fácilmente observables, incluye el color, el brillo, la opacidad y el amarillamiento.
- Densidad. Cantidad de materia por unidad de volumen, cuanto más amorfa es su estructura menor es su densidad.
- Dureza. Es una medida de la resistencia a la deformación plástica localizada.
- Conductancia. Capacidad de conducción calorífica o eléctrica de un material. Los plásticos no son conductores ni de calor ni de la electricidad.
- Impermeabilidad. Propiedad de las sustancias que impide pasar los líquidos.
- Temperatura de fusión. Temperatura en la cual un sólido pasa a líquido. Los plásticos funden a baja temperatura.
- Dilatación. Aumento del volumen de un cuerpo al aumentar su temperatura.

- Resistencia. Es la fuerza máxima que se le puede ejercer a un material sin que se produzca fractura.
- Ductilidad. Es la propiedad que indica si un material puede deformarse plásticamente sin romperse.
- Resiliencia. Es la capacidad que tiene un material de absorber energía elástica cuando es deformado y de entregarla cuando no se ejerce esfuerzo sobre él.
- Tenacidad. Es la capacidad de un material de absorber energía antes de la fractura, un material tenaz tiene alta ductilidad y resistencia. Los plásticos con alta tenacidad no son biodegradables ni fáciles de reciclar.
- Elasticidad. Capacidad recuperar su forma primitiva después de haber sido deformado.
- Maleabilidad. Capacidad de un material de sufrir deformación sin rotura. Los plásticos son deformables; forman láminas fácilmente.
- Fragilidad. Falta de resistencia a la rotura por choque.
- Rigidez. Resistencia al cambio de forma.
- Punción. Es la resistencia a ser perforado.

De acuerdo al grado de deformación en relación a sus propiedades mecánicas, los polímeros se pueden clasificar en cuatro categorías principales (Coreño-Alonso & Méndez-Bautista, 2010):

- Elastómeros. Tienen cadenas flexibles, lo que los hace fácilmente deformables a bajos esfuerzos, esto se debe a las fuerzas intermoleculares bajas.
- Plásticos flexibles. Tienen baja resistencia a la tensión. En comparación a los elastómeros, sus fuerzas intermoleculares son más altas, pero sus cadenas aún conservan flexibilidad.
- Plásticos rígidos. Tienen moderada resistencia tensil y su elongación es muy pequeña, su estructura es densamente entrecruzada por lo que son más rígidas y poseen baja flexibilidad.
- Fibras. Tienen alta resistencia a la tensión y sufren poca deformación debido a que tienen gran fuerza intermolecular.

### 2.2.2 Propiedades químicas del plástico

Estas propiedades se ven afectadas debido a reacciones químicas o cuando hay cambios en los enlaces, estas son (Bonten, 2019; Crawford & Martin, 2020):

- Degradación. Esta se produce debido a la pérdida de la estructura molecular a través de reacciones químicas que dan lugar a la ruptura de los enlaces primarios en el polímero.
- Solubilidad. Es la pérdida de la estructura molecular del polímero al ser sometido a diferentes solventes.

### 2.2.3 Propiedades térmicas del plástico

Las propiedades de las películas de plástico se ven afectadas por la temperatura, afectando también su rendimiento (Crawford & Martin, 2020), estas son:

- Índice de fluidez de fusión. Es una medida de la facilidad de fluidez de la fusión de un polímero termoplástico. Se define como el peso de polímero en gramos que fluye en 10 minutos a través de una boquilla de diámetro y longitud específicos por una presión aplicada por un peso dado a una temperatura dada.
- Temperatura de deflexión por calor. Es una medida de la resistencia de un polímero a la distorsión bajo una carga dada a temperaturas elevadas.
- La temperatura de ablandamiento de Vicat. Es la temperatura a la que una aguja de punta plana penetra el plástico.
- Punto de fusión.
- La temperatura de transición vítrea. Es una propiedad importante cuando se consideran polímeros para un uso final particular, es la temperatura por debajo de la cual las propiedades físicas de los plásticos cambian de manera similar a las de un estado vítreo o cristalino, y por encima de la cual se comportan como materiales gomosos.

### 2.3 Residuos Plásticos Contexto Mundial y Nacional

Los seres humanos se han beneficiado del uso de polímeros desde aproximadamente el año 1600 a. C., cuando los antiguos mesoamericanos transformaron el caucho natural en bolas, figurillas y bandas elásticas (Hosler, 1999). Con la evolución de la tecnología aparecieron formas de crear nuevos polímeros, fue así como en 1839, Goodyear inventó el caucho vulcanizado y Eduard Simon, un boticario alemán, descubrió el poliestireno (PS) (Andrady & Neal, 2009). La primera producción a escala de polímeros sintéticos (plásticos) tuvo lugar en 1940, desde ese momento, la producción, el consumo y la tasa de generación de residuos plásticos ha aumentado considerablemente, así como ha incrementado la cantidad de recursos que se invierten en la fabricación de polímeros sintéticos, esto incluye un consumo cercano al 8% de la producción mundial de petróleo, así como el 4% de las materias primas, entre el 3% y 4% de energía y lo más preocupante es que el 56% de esta producción es de productos de un solo uso (Al-Salem et al., 2009).

Cifras sobre la producción mundial de plástico indican que de 1,5 millones de toneladas producidas en la década de 1950 pasamos a 335 millones de toneladas en 2016, esto con su consecuente descarga de desechos plásticos al medio ambiente (Getor et al., 2020). Actualmente la producción de plástico alcanzó una producción mundial que supera los 348 millones de toneladas y se estima que la producción de plástico se duplicará para 2035 (Walker et al., 2020), y según el informe del Foro Económico Mundial de 2016 sobre "La nueva economía de los plásticos", se estima que para 2050 puede haber más plástico que peces en los océanos del mundo (Getor et al., 2020).

Los residuos plásticos son un problema global desde el inicio de su producción de forma masiva a mediados del siglo pasado y año tras año la situación empeora (Rojo-Nieto & Montoto Martínez, 2017). En los últimos 60 años la producción de plásticos se ha hecho en masa y es sabido que la mayoría de estos materiales no son biodegradables, por el contrario, son bastante duraderos y pueden llegar a estar en el ambiente por décadas, siglos o incluso








milenios, ya que la degradación depende de factores físicos como el nivel de exposición a la luz ultravioleta, el oxígeno y la temperatura, incluso cuando un residuo polimérico no tiene una disposición correcta y se degrada a la intemperie, el propio polímero necesita un tiempo significativo para degradarse completamente, lo que conduce a causar daños ambientales, incluida la contaminación del agua (Oehlmann et al., 2009; Hopewell, Dvorak, & Kosior, 2009).

Un informe de investigación de la plataforma de periodismo Orb, denominado “Contaminación del agua a nivel global por polímeros sintéticos” (Kosuth et al., 2017), reveló que de 159 muestras de agua recolectadas alrededor del mundo -incluyendo 3 muestras de agua embotellada- en el 83% de las muestras se encontraron partículas microscópicas de plástico, incluso en muestras de agua potable tomadas de grifos que tienen sistemas de filtración, por lo que se deduce que las partículas de millones de toneladas de plástico que se han desechado por años, pueden ser fácilmente consumidas por el hombre.

El uso extensivo de plásticos en todos los sectores de la industria, en la agricultura, y en la vida cotidiana, ha llevado a un incremento continuo de RP creando un grave problema en el medio ambiente. La reutilización de materiales polímeros post-consumo o post-industriales, es la forma adecuada de resolver las afectaciones ambientales, ofreciendo recursos reciclados de bajo costo, esto ha conllevado a una mayor demanda o estrategias alternativas de gestión de desechos, como la incorporación de resina reciclada en el proceso de producción de plástico junto con la resina virgen (Payne et al., 2019).

Con el propósito de controlar la calidad en el reciclado de los desechos poliméricos desde su recolección y clasificación, en el año 1988 la Sociedad de la Industria de Plásticos (SPI), crea el Código de Identificación de Resinas (RIC por sus siglas en inglés), que consta de 7 categorías, cada una con relación a un polímero específico, este código generalmente se encuentra impreso en cada producto. En la tabla 1 se muestran los principales usos para cada categoría.

Tabla 1: Principales usos de acuerdo con el código de identificación de resinas

Código	Sigla	Nombre	Usos principales
	PET	Polietileno tereftalato	Envases para alimentos y bebidas, cremas, cosméticos, farmacéuticos
	PEAD (HDPE)	Polietileno de alta densidad	Bolsas para compras, envases para detergentes, leche o jugos, tapas, etc
	PVC	Policloruro de vinilo	Mangueras, recubrimientos para cables, bolsas de sangre, envoltura para carne
	PEBD (LDPE)	Polietileno de baja densidad	Películas para empaque, botellas flexibles, bolsas para basura, envases para laboratorio
	PP	Polipropileno	Bolsas para frituras, pitillos, cintas para empacar, envases para uso en microondas y envases desechables
	PS	Poliestireno	Cajas para CD, cubiertos plásticos, juguetes, empaques para huevos, empaques para proteger mercancía frágil
		Otros	Biberones, botellas de bebidas deportivas, autopartes, piezas para empaques

Fuente: Elaboración propia a partir de Introduction to Polymer and Their Recycling Techniques y Norma Técnica Icontec NTC 3205 (ICONTEC, 1991; Kulkarni, 2018).

Gran parte de los RP que se producen en el mundo proviene de polímeros como el polietileno (PEAD o PEBD), polipropileno (PP) y tereftalato de polietileno (PET) entre otros, razón por la que en los últimos años se ha buscado la forma de reducir por medio de reciclaje la cantidad de estos residuos que llegan a los vertederos (Saleem et al., 2018; F. Zhang et al., 2020).

En 2010 aproximadamente 274 MT de polímeros sintéticos a nivel mundial dejaron la fase de uso y se convirtieron en residuos; para el año 2015 esta cifra llegó a 302 MT, de las cuales, el 54% corresponde a plásticos provenientes de embalaje y el 5% a desechos resultantes de la construcción (Geyer et al., 2017), para el mismo año la cantidad de residuos plásticos mal gestionados (RPMG) a nivel mundial fue de aproximadamente 80 MT distribuidos de la siguiente forma: Asia 49 MT, África 18 MT, América Latina y el Caribe 7 MT, Europa 5,15 MT, Norteamérica 1,65 MT y Oceanía 0,19 MT; éstas cifras podrían triplicarse para 2060 a 210 MT a nivel mundial, siendo desproporcionadamente alta en los continentes de África y Asia y el 91% de estos desechos se transportará a través de las cuencas hidrográficas hacia el océano siendo los ríos las principales vías para la basura plástica (L. Lebreton & Andrady, 2019).

En 2016, más de 8,4 millones de toneladas de plástico fueron recicladas en el mundo, un número muy bajo si se tiene en cuenta que la producción de plástico el mismo año llegó a 335 millones de toneladas, otro dato importante en cuanto a desechos plásticos es el destino de los desechos colectados, el 27,3% terminó en vertederos de basura, el 31,1% fue reciclado y el 41,6% se utilizó en procesos de recuperación de energía (Plastics Europe, 2017).

Para 2018 la cantidad de plástico producido a nivel global llegó a las 360 MT, el continente con la mayor producción es Asia con el 51%, mientras que América latina produjo el 4%, cabe destacar que en este año también se muestra una tendencia positiva hacia el reciclaje en Europa, sin embargo, más del 18% todavía no es correctamente gestionado (Plastics Europe, 2019), lo cual indica que la mayor parte de los residuos plásticos se reciclan y reutilizan, mientras que la cantidad de plástico que llega a los vertederos es cada vez menor.

En relación al consumo de plástico en Colombia, cada persona consume aproximadamente 24 kilos de plástico al año, lo que es 1,25 MT para el país, el agravante es que el 56% del total de estos plásticos (700.000 toneladas) son de uso único, luego de ser

utilizados se desechan pero siguen contaminando durante décadas o siglos (Greenpeace Colombia, 2018).

Del total de desechos sólidos que se generan en las principales ciudades de Colombia, en promedio el 10,78% corresponde a desechos plásticos (CONPES 3874, 2016), en promedio el país genera al día 1.075 toneladas de desechos plásticos, acercándose al promedio mundial de 1.420 (Gracia C. et al., 2018), para el caso de Bogotá y según cifras de 2017, el 56% de los desechos generados diariamente corresponde a plásticos incluidos los de un solo uso. De acuerdo al Ministerio del Medio Ambiente, en Colombia se recicla entre el 14 y 15% de estos residuos, en Bogotá la cifra de desechos plásticos en relación al total de residuos sólidos es de 31% y sólo se aprovecha el 8% de este material (Siperintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2019).

Desde junio de 2019 hasta marzo de 2020 se llevó a cabo un estudio de las empresas transformadoras de plástico en las dos principales ciudades del país que concentran la mayor parte de esta industria, Bogotá y Medellín y sus áreas metropolitanas, ubicando 200 y 56 empresas respectivamente. Para sus procesos productivos, en Bogotá el 79% de las empresas utilizan entre el 81% y 100% de material post- consumo (reciclado), mientras que en Medellín lo hacen el 43% de las empresas (Acoplásticos Colombia, 2020).

## 2.4 Microplástico

Los microplásticos son pequeños fragmentos de desechos plásticos que se originan de la liberación directa de partículas de plástico y como consecuencia de la fragmentación de artículos más grandes, el término ha sido ampliamente utilizado desde 2004 cuando Richard Thompson usó el término para describir la acumulación de piezas de plástico microscópicas en sedimentos marinos (Thompson, 2015). Algunos autores definen el tamaño de los MP < 5mm, otros utilizan el tamaño máximo del MP en 1mm, sin embargo la primera es la medida más empleada (Claessens et al., 2013).

### **2.4.1 Orígenes del Microplástico**

Los microplásticos tienen 2 orígenes: los MP primarios son partículas creadas intencionalmente en el rango de tamaños de MP, se utilizan principalmente en productos cosméticos y de limpieza que se desechan a través de las aguas residuales, los MP secundarios provienen de la fragmentación por acción del medio ambiente o la descomposición durante el uso de plásticos de tamaño mayor, el origen de los MP secundarios se da de dos formas: fragmentación en uso y fragmentación post-uso (Welden & Lusher, 2020).

La fragmentación en uso se puede dar por el deterioro del material mientras está siendo usado, como el desgaste de neumáticos, formación de microfibras durante el lavado de la ropa o el uso de las redes de pesca (Welden & Cowie, 2017), la fragmentación posterior al uso se da por la mala gestión de RP y su exposición al viento, la acción de las olas, la arena o los rayos UV que debilitan el material plástico y conducen a la fragmentación de piezas cada vez más pequeñas hasta que la exposición a los elementos degradantes se reduce cuando los MP terminan en el fondo del mar o enterrados en los sedimentos (Welden & Lusher, 2020).

### **2.4.2 Contexto Mundial y Nacional**

Se estima que entre el 42% y el 96% de la basura marina en los océanos y ecosistemas marino-costeros son plásticos (Delvalle de Borrero et al., 2020). éstos residuos se pueden encontrar como macroplásticos y microplásticos, los últimos originados a partir de la degradación física, (movimiento de las olas, efectos de temperatura o radiación ultravioleta), y degradación química (oxidación, hidrólisis), de plásticos de mayor tamaño hasta convertirse en partículas y fibras tan pequeñas que pueden ser imperceptibles para el ojo humano (Rojo-Nieto & Montoto Martínez, 2017).

Estudios recientes han reportado la presencia de MP en los océanos abiertos, incluidas las aguas polares, los mares marginales y las aguas costeras, sin embargo, el mapeo de la abundancia de microplásticos en el océano real ha resultado difícil, porque no se dispone de mediciones suficientes para todos los océanos del mundo (Isobe et al., 2019). Los datos de diferentes estudios a menudo son difíciles de comparar debido a la falta de metodologías de muestreo estandarizadas, unidades de normalización y expresión de datos, así como a la definición, el tamaño y la caracterización de los microplásticos, a pesar de estos aspectos técnicos, la distribución de plásticos se ha documentado en varios mares, con concentraciones muy variables (Avio et al., 2017).

Los RPMG pueden llegar al ambiente natural especialmente de países con una alta densidad de población, una síntesis de múltiples encuestas realizadas en el hemisferio sur ha sugerido que los microplásticos están menos extendidos que en los océanos del hemisferio norte, por lo que se espera un notable contraste en la cantidad de microplásticos a través de una sola franja meridional, mientras que la abundancia zonal probablemente dependerá de las condiciones oceánicas que fluctúan en tiempo y espacio (Isobe et al., 2019).

Se estima un mínimo de 21.290 toneladas de desechos plásticos flotantes en la zona de acumulación del giro subtropical del pacífico norte. En este momento, se han identificado un total de 5 parches de basura oceánicos (Atlántico Norte, Atlántico Sur, Índico Sur, Pacífico Norte y Pacífico Sur), y se pronostica que se producirá otro en el Mar de Barents (van Sebille et al., 2012). Casi 270,000 toneladas de plástico flotarían actualmente en los océanos de acuerdo con los resultados de 24 expediciones a través de los cinco giros subtropicales, la costa de Australia, la Bahía de Bengala y el Mar Mediterráneo, con base en el número total de partículas de plástico y su peso, los investigadores estiman un mínimo de 5,25 billones de partículas con un peso de 268.940 toneladas (Avio et al., 2017).

El océano pacífico recibe el 52% del total de los RPMG, se han detectado grandes cantidades de microplásticos en la región descrita como la isla de basura del pacífico y en los mares de Asia Oriental (Isobe et al., 2019), esto debido a que las áreas que rodean el Mar

Oriental de China se consideran uno de los mayores emisores de microplásticos en el mundo (Z. Zhang et al., 2020). Un estudio reciente llevado a cabo por investigadores del Centro Oceanográfico Nacional del Reino Unido, demostró que la masa combinada de solo los tres plásticos más comunes: PET, PP y PS, suspendida en los 200 m superiores del Océano Atlántico es de 11,6 a 21,1 MT.

Teniendo en cuenta que se encontrarán plásticos de otros tipos de polímeros en las profundidades del océano y en los sedimentos, los resultados indican que las existencias de plásticos oceánicos son mucho más altas de lo que estudios anteriores demostraban, esto se debe a que anteriormente sólo se medían las concentraciones de partículas MP de la superficie del océano. Si se asume que la concentración de microplásticos de las capas superiores es equivalente a la que hay hasta el fondo marino, entonces el Atlántico podría albergar unos 200 MT de basura plástica y solo de los tres tipos de plástico que se han analizado (Pabortsava & Lampitt, 2020).

En Colombia, análisis realizados en 2017 a muestras de 38 playas de interés turístico en 7 departamentos de las 2 costas colombianas, se encontró que el mayor porcentaje de artículos hallados es de un solo uso, entre ellos vasos, bolsas de agua, cubiertos plásticos y recipientes para alimentos, seguido por artículos de consumo como textiles, cepillos de dientes y zapatos y por últimos productos de infraestructura como cinta aislante y tubos de PVC, lo anterior indica que el origen de los residuos de MP es local y está asociado a actividades turísticas, de pesca y navegación.

En todas las muestras se encontraron microplásticos, 67% en el Caribe y 33% en el Pacífico, de acuerdo con los tipos de microplásticos, el fragmento es el de mayor presencia con porcentajes de 71% y 56% respectivamente, lo que indica que provienen de la fragmentación de piezas plásticas de mayor tamaño provenientes del turismo principalmente.

El segundo tipo de MP más representativo son los filamentos que provienen de fibras y nylon asociados a la actividad de pesca y al vertimiento de aguas residuales, que es considerado el mayor contaminante de las aguas marinas en Colombia. Las concentraciones de microplásticos estuvieron entre 0,14 y 12,3 MP/m<sup>3</sup>, estas concentraciones están por debajo de las concentraciones de microplásticos en aguas marinas y costeras reportadas en estudios similares para China (0,15 - 76,25 MP/m<sup>3</sup>), Eslovenia (0,19 - 41,32 MP/m<sup>3</sup>) y Corea del Sur (0,62 - 860 MP/m<sup>3</sup>) en los cuales las altas concentraciones de microplásticos son consecuencia de la acumulación por las corrientes marinas, vertimientos de aguas residuales y descargas de ríos con alta carga de MP.

Por otra parte, las concentraciones estuvieron por encima de las registradas en Francia (0,01 - 1,43 MP/m<sup>3</sup>), Catar (0 - 3 MP/m<sup>3</sup>) y California (0,004 - 0,190 MP/m<sup>3</sup>). Por departamento, la mayor concentración se encontró en Bolívar con rango de concentración de 0,08 - 12,32 MP/m<sup>3</sup>, seguido del Valle del Cauca con 0,06 - 3,87 MP/m<sup>3</sup>, y los departamentos con menores concentraciones fueron San Andrés con 0,02 - 0,93 MP/m<sup>3</sup> y Chocó con 0,01- 0,37 MP/m<sup>3</sup> (Garcés et al., 2018).

En otro estudio desarrollado durante 2019 y 2020 en 24 playas de la costa caribe central del país, se recolectaron artículos plásticos de 43 tipos diferentes, los resultados mostraron una abundancia de plástico promedio de 4.54 ítems/m<sup>2</sup> siendo ocho tipologías responsables del 82% de todo el plástico recogido. Con estos resultados la franja costera queda categorizada como franja costera “extremadamente sucia” con una “abundancia muy alta” de plásticos, según el Índice de Costa Limpia (CCI) y el Índice de Abundancia de Plásticos (PAI) respectivamente (Rangel-Buitrago et al., 2020).

Otra investigación que evaluó la contaminación con MP en 43 playas de arena en las costas del Caribe y el Pacífico colombiano, dio como resultado la existencia de partículas de MP entre 1 y 5 mm en la arena de todas las playas estudiadas sin mayores diferencias entre playas urbanas y rurales y entre áreas marinas protegidas y no protegidas. Las playas más contaminadas por MP fueron Cartagena (249 - 1387 MP/m<sup>2</sup>), Santa Marta (144 - 791

MP/m<sup>2</sup>) y Córdoba (4 - 685 MP/m<sup>2</sup>) en la costa del Caribe y el Pacífico Chocóano (3 - 317 MP/m<sup>2</sup>) y Buenaventura (121 - 280 MP/m<sup>2</sup>) en la costa del Pacífico. La distribución de las formas encontradas se muestra en la tabla 2.

Tabla 2: Distribución de las formas de microplástico halladas en las costas del Caribe y Pacífico colombiano

<b>Formas de MP</b>	<b>Costas del Caribe</b>	<b>Costas del Pacífico</b>	<b>Datos generales</b>
<b>Fragmentos</b>	52%	52%	52%
<b>Fibras</b>	19%	26%	20%
<b>Pellet</b>	12%	6%	11%
<b>Espuma</b>	9%	10%	10%
<b>Gránulos</b>	4%	4%	4%
<b>Películas</b>	4%	2%	3%

Fuente. Elaboración propia a partir de Plastic litter pollution along sandy beaches in the Caribbean and Pacific coast of Colombia (Garcés-Ordóñez et al., 2020)

Se identificaron siete tipos de polímeros en las muestras de MP, de 1000 microplásticos analizados, el 50% fueron polietileno (PE), 28% poliestireno (PS), 20% polipropileno (PP), 0,6% cloruro de polivinilo (PVC), 0,5% poliuretano (PU), 0,4% poliestireno de alto impacto (HIPS) y 0,3% de tereftalato de polietileno (PET).

En todas las playas se encontraron todos los tipos de polímeros, excepto en las playas del Pacífico, donde no se encontró PU ni PVC (Garcés-Ordóñez et al., 2020). En la tabla 3 se relacionan las formas de MP halladas con el tipo de polímero del cual está formado.

Tabla 3: Distribución de las formas de microplástico halladas en las costas del Caribe y Pacífico colombiano con relación al tipo de polímero

<b>Formas de MP</b>	<b>PE</b>	<b>PS</b>	<b>PP</b>	<b>PVC</b>	<b>PU</b>	<b>HIPS</b>	<b>PET</b>
<b>Fragmentos</b>	69,7%	0,5%	28,4%	1%			
<b>Fibras</b>	71,4%		14,3%		14,3%		
<b>Pellet</b>	72,9%		27,1%				
<b>Espuma</b>		97,6%	0,3%		0,7%	1,4%	
<b>Gránulos</b>	100%						
<b>Películas</b>	50%						50%

Fuente. Elaboración propia a partir de Plastic litter pollution along sandy beaches in the Caribbean and Pacific coast of Colombia (Garcés-Ordóñez et al., 2020)

### 2.4.3 Tipos de microplásticos

La clasificación y categorización de los microplásticos ha sido variable según la disciplina, esto deriva en la aparición de terminología y definiciones comunes. Recientemente, un grupo de científicos internacionales sugirió un marco para las definiciones en cuanto a plásticos se refiere, considerando los impactos biológicos y otros temas importantes de disciplina, sugiriendo que el tamaño no es el factor descriptivo más importante (Welden & Lusher, 2020).

En esta clasificación se considerarán las propiedades más relevantes en la definición de un plástico, como son: composición química, estado sólido y solubilidad, adicionalmente se incluirán características como: el tamaño, la forma y la estructura, el color y el origen para una categorización más amplia (Hartmann et al., 2019).

#### 2.4.3.1 Composición química

La composición química es el criterio más importante a tener en cuenta para categorizar los desechos plásticos, dentro de los cuales se encuentran:

- Polímeros. Hacen referencia a las moléculas de alta masa molecular relativa con estructura formada por la repetición de moléculas de baja densidad relativa.
- Aditivos. Las principales clases de aditivos incluyen plastificantes, estabilizadores, retardantes de llama, modificadores de flujo, auxiliares tecnológicos, modificadores de impacto y antioxidantes.
- Copolímeros. Son polímeros creados a partir de más de un tipo de monómero, estos incluyen acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS), etileno-acetato de vinilo (EVA) y caucho de estireno-butadieno (SBR).
- Compuestos. Los compuestos poliméricos incluyen dos componentes: la matriz polimérica y el refuerzo, algunos de estos son: poliéster reforzado con fibra de vidrio o epoxi reforzado con grafito.
- Recubrimientos superficiales como las pinturas.
- Partículas de desgaste de neumáticos.

#### ***2.4.3.2 Estado sólido***

Algunos polímeros pueden ser similares a la cera, semisólidos o líquidos, dependiendo de la temperatura a la cual son sometidos. Los plásticos se usan tanto como materiales duros y frágiles como también más blandos y más dúctiles (PVC plastificado, PE, PP) y, dependiendo del peso molecular, existen como semisólidos cerosos en un amplio rango de temperaturas. Algunos polímeros (caucho, PE, PP, PVC), son sólidos blandos a temperatura ambiente. Sin embargo, los polímeros semicristalinos tienen una temperatura lo suficientemente alta como para clasificarlos como sólidos (Welden & Lusher, 2020).

#### ***2.4.3.3 Solubilidad***

La mayoría de los polímeros convencionales son poco solubles en agua, pero algunos polímeros sintéticos se disuelven fácilmente (acetato de polivinilo PVA o PEG de bajo peso molecular) (Hartmann et al., 2019).

#### **2.4.3.4 Tamaño**

El tamaño de partícula será de gran relevancia ecológica porque es un factor importante que determina la interacción del elemento con la biota y su impacto medioambiental. Actualmente, no existe un consenso claro sobre el uso de categorías de tamaño, sin embargo, la clasificación más empleada incluye las siguientes categorías: (1) nanoplásticos: 1 a 1000 nm (2) microplásticos: 1 a 5 mm; (3) mesoplásticos: 5 a <25 mm; (4) macropásticos: 250 mm y más grandes. La clasificación de tamaño para microplásticos se refieren a la dimensión más grande del MP, la razón detrás de esto es que la dimensión más grande de un artículo determinará principalmente la ingestión por la biota (Acosta-Coley et al., 2019).

#### **2.4.3.5 Forma y estructura**

Los descriptores frecuentes de la forma son esferas, espumas, fibras, fragmentos, películas y escamas. Los términos "esferoides" y "gránulos cilíndricos" se pueden usar para esferas aproximadas y formas cilíndricas, respectivamente. Los "fragmentos" o "partículas irregulares" también representan una categoría bastante ambigua, se adopta comúnmente para describir partículas con forma irregular. La categoría de "películas" es bastante sencilla ya que incluye objetos planos que son considerablemente más pequeños en una dimensión que en las otras dos. Los plásticos que son significativamente más largos en uno que ancho en dos dimensiones (relación longitud-diámetro) se describen comúnmente como fibras o filamentos. La forma más abundante de partículas de plástico que se encuentran en las aguas residuales es la fibra debido a la descarga de las lavadoras domésticas por los polímeros sintéticos que contiene la ropa (Poerio et al., 2019).

#### **2.4.3.6 Color**

Esta clasificación es útil para poder identificar posibles fuentes. Es importante destacar que la información de color puede estar sesgada ya que los colores más brillantes se ven más

fácilmente en una inspección visual por lo que las partículas oscuras, transparentes o translúcidas pueden estar subrepresentadas. Además, la decoloración puede tener lugar durante la meteorización, lo que debe considerarse en la interpretación de los datos (Hartmann et al., 2019).

#### **2.4.3.7 Origen**

El origen de los desechos plásticos se usa comúnmente en la clasificación de MP, que se clasifican en microplásticos "primarios" y "secundarios", el primero se refiere a microplásticos producidos intencionalmente en ese rango de tamaño, mientras que los microplásticos "secundarios" se forman en el medio ambiente a través de la fragmentación o el desgaste de los artículos que contienen plástico (Welden & Lusher, 2020).

### **2.5 Procesos para la recuperación del plástico**

Debido al crecimiento de la población y la cultura de "desecho" que persiste en gran parte del mundo, la capacidad de los vertederos para el manejo de nuestros residuos es insuficiente por el espacio requerido, resultando en la contaminación del suelo, agua y aire. Esto se complica aún más ya que debido al auge en el uso de los plásticos, las nuevas investigaciones y aplicaciones sobre estos materiales, generaron una producción de plásticos con más alta resistencia a la corrosión, por lo que ahora estos materiales son usados ampliamente en múltiples industrias (Gug et al., 2015).

Para combatir el problema de estos residuos hay 3 caminos (Sturzenegger, 2014): reducir la generación de residuos, reutilizarlos o someter los residuos a algún tipo de proceso para reintegrarlos nuevamente al ciclo de vida. El primer esfuerzo por el reciclaje de productos plásticos surgió en la década de los setenta a partir de 3 factores principalmente: primero por la importante cifra de producción de estos compuestos, segundo, por la creciente generación de residuos plásticos y tercero, por el considerable aumento en los precios de las materias primas para su producción, básicamente por el precio del petróleo (Parres, 2005).

Del total de los RP a nivel mundial, en la tabla 4 se muestra el porcentaje que corresponde a cada polímero.

Tabla 4: Clasificación de residuos plásticos

<b>Sigla</b>	<b>Polímero</b>	<b>% de residuos plásticos</b>
<b>PEAD</b>	Polietileno de baja densidad	23
<b>PP</b>	Polipropileno	18
<b>PEBD</b>	Polietileno de alta densidad	18
<b>PET</b>	Polietileno tereftalato	11,7
<b>PS</b>	Poliestireno	11
<b>PVC</b>	Policloruro de vinilo	10,9
<b>PU</b>	Poliuretano	2,7
<b>Otros</b>		9,8

Fuente. Elaboración propia con base en Oil sorbents from plastic wastes and polymers: A review (Saleem et al., 2018)

Termoplásticos, incluidos PET, PE y PP tienen un alto potencial para ser reciclados mecánicamente. Polímeros termoestables como el poliéster insaturado o la resina epoxi no pueden ser reciclados mecánicamente, excepto para ser reutilizados como material de relleno una vez que hayan sido reducidos en tamaño o pulverizados (Kulkarni, 2018). Algunas empresas que ya trabajan en el reciclaje y aprovechamiento de polímeros y sus cifras son las siguientes:

- Botellas PET. Es un residuo fácil de recolectar, el PET puede ser reciclado de forma mecánica o por despolimerización para crear nuevos PET a partir de sus monómeros. El PET reciclado (RPET) se utiliza para producir fibras, láminas, flejes y botellas RPET de alta calidad. La empresa ReciclaRexam Prescription Products es la primera

en desarrollar y comercializar un compuesto líquido hecho 100% de PET reciclado (RPET) que cumple con los mismos estándares del gobierno de Estados Unidos como el PET virgen. Method Products Inc. ha convertido tres de sus líneas de producto de EE. UU. a 100% RPET. Nestlé Waters usa 50% de RPET en su botella de agua ReBorn. Danone ha introducido progresivamente RPET (25%) en sus botellas de agua Evian. Coca-Cola apunta a un reciclaje 100% botella a botella a largo plazo después del 25% reciclado en 2015.

- Polietileno de alta densidad. Las botellas Nextek ([nextek.org](http://nextek.org)), un fabricante europeo de botellas de leche de calidad alimentaria, utiliza el proceso desarrollado por WRsAP UK. Las botellas contienen hasta un 50% de contenido reciclado cumplen con todos los requisitos de contacto con alimentos de la Unión Europea y el Reino Unido.
- Residuos eléctricos y electrónicos. La empresa Axion's Salford utiliza el 100% de plástico reciclado para fabricar llaveros. Desde 2008 los televisores Sony aprovecha el plástico reciclado que proviene de su programa de reciclaje cerrado que permite recuperar algunas piezas de plástico y espumas de sus televisores.
- Piezas automotrices. se puede aprovechar desde un 2% hasta un 7% del peso del vehículo en material plástico. La tecnología de reciclaje de DuPont convierte las piezas hechas de nylon 6 o 66 en nuevas piezas a través de la disolución de la poliamida (PA) para producir nuevos tanques y radiadores. De un vehículo también se puede reutilizar el PP y la goma de los neumáticos, estos se utilizan para producir elastómero termoplástico (TPE) que contiene de un 33% a un 80% material reciclado, el TPE se utiliza en tapicería para vehículos, guardabarros, bordes antiarrastre, revestimiento para el arco de las ruedas, spoilers, entre otros.
- Productos de construcción. el reciclaje mecánico del PVC puede sustituir directamente la misma cantidad de polímero virgen que se utilizaría en una nueva aplicación.

Los materiales plásticos se pueden tratar de varias maneras y la facilidad o complejidad del reciclaje varía según el tipo de polímero, su diseño y el tipo de producto. Por ejemplo, los recipientes rígidos fabricados de un solo polímero son más simples y económicos de

reciclar que materiales multicapa o fabricados de múltiples componentes (Hopewell et al., 2009).

La industria del plástico ha identificado con éxito las tecnologías viables para la recuperación, el tratamiento, y el reciclaje de residuos plásticos, en teoría hay 4 rutas para su tratamiento: Re-extrusión que corresponde al reciclaje primario, el reciclaje mecánico, también conocido como reciclaje secundario, el reciclaje químico o terciario y el reciclaje cuaternario conocido como reciclaje térmico o de recuperación de energía, este último no está reconocido por las agencias gubernamentales de Estados Unidos o Europa como una forma de reciclaje de plásticos por la afectación que genera al medio ambiente (Fisher, 2004). El reciclaje primario es el procesamiento de productos plásticos de desecho en un producto con características similares a las del producto original, generalmente se da con los mismos residuos del proceso de fabricación y en el mismo lugar dónde se produce, por lo que nos centraremos en las otras alternativas.

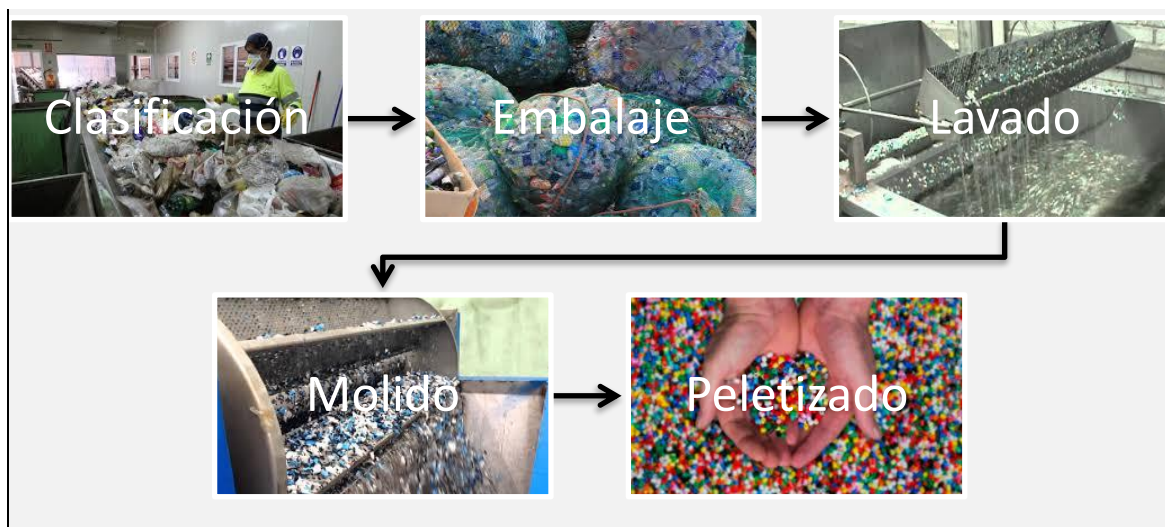
### 2.5.1 Reciclaje mecánico

El reciclaje mecánico, también conocido como reciclaje secundario es el proceso de recuperación de los residuos plásticos para el re-uso en manufactura de productos plásticos a partir de medios mecánicos (Al-Salem et al., 2009). Este proceso consiste en convertir los residuos plásticos en materias primas o productos secundarios sin cambiar significativamente la estructura química del material, en la actualidad es casi la única forma de reciclar en Europa y corresponde al 99% del reciclaje (PlasticsEurope, 2018). Para los residuos plásticos este proceso puede incluir los siguientes pasos (figura 2), cada uno de los cuales puede ocurrir en cualquier lugar y varias veces a lo largo de la secuencia (Ragaert et al., 2017):

- Separación y clasificación: esto ocurre en base a la forma, densidad, tamaño, color o composición química del plástico.

- Embalaje: si el plástico no se procesa dónde está clasificado, es a menudo embalado para fines de transporte.
- Lavado: eliminación de contaminantes, con frecuencia de tipo orgánico.
- Molido: reducción del tamaño del plástico a hojuelas.
- Aglomerado y peletizado: reprocesamiento opcional de las hojuelas en un granulado.

Figura 2: Pasos en el proceso de reciclaje mecánico



Fuente. Elaboración propia.

A un polímero reciclado mecánicamente se le puede dar nueva forma después de fundirse, en este caso los métodos de procesamiento mecánico más conocidos son: el moldeo por inyección, extrusión, moldeo rotacional, y prensado con calor (Al-Salem et al., 2010). Los polímeros termoplásticos, como PP, PE, PET y PVC, normalmente se pueden reciclar mecánicamente (Ignatyev et al., 2014).

### 2.5.2 Reciclaje químico

El reciclaje químico o terciario es un término usado para referirse a procesos tecnológicos avanzados que convierten los materiales plásticos en moléculas que son adecuadas para su uso como materia prima en la producción de nuevos productos petroquímicos y plásticos (Mastellone et al., 2002). Este tipo de reciclaje ayuda a eliminar de los vertederos de basura plásticos que no se pueden reciclar de forma sostenible por procesos mecánicos, por ejemplo: plásticos laminados y compuestos, plásticos mezclados de baja calidad y plásticos que se han ensuciado con restos de alimentos (Plastics Europe, 2017). El interés por usar residuos plásticos como materias primas ha crecido ya que provienen del petróleo y tienen un alto contenido de hidrocarburos (Ragaert et al., 2017). A continuación, se describen los tipos de reciclaje químico para la producción de monómeros y materias primas:

- Quimiólisis. Es la desintegración o despolimerización de un polímero a sus monómeros base con los que fue fabricado por acción de agentes químicos. En este caso, la despolimerización es la reacción inversa a la formación del polímero. Hay diferentes rutas de despolimerización tales como metanólisis, glucólisis, hidrólisis, amonólisis, amiólisis e hidrogenación, dependiendo del agente químico utilizado para la ruptura de la cadena (Kulkarni, 2018).
- Pirólisis. También conocido como craqueo térmico de polímeros en atmósferas inertes, es el tratamiento de residuos plásticos en presencia de calor bajo temperaturas controladas sin catalizadores (Al-Salem et al., 2009). La pirólisis es una tecnología importante en el reciclaje de residuos plásticos que son difíciles de despolimerizar y que actualmente no son reciclados mecánicamente, esta opción puede manejar materiales altamente contaminados. Aunque la pirólisis es una tecnología simple, solo es económicamente viable cuando se lleva a cabo en grandes volúmenes (Ragaert et al., 2017).
- Craqueo catalítico fluido. El proceso de craqueo catalítico fluido se basa en la ruptura de cadenas de hidrocarburos mediante la acción de un catalizador que favorece que

las reacciones se produzcan a una temperatura más baja que la necesaria para el craqueo térmico de la misma carga. (Alvarado et al., 2015)

- Tecnologías de hidrógeno. La principal diferencia con el craqueo catalítico de plásticos es la adición de hidrógeno. El proceso tiene lugar a presiones elevadas de hidrógeno, aproximadamente 70 atm y temperaturas en el rango de 375 – 400° C. La presencia de hidrógeno mejora significativamente la calidad del producto (Al-Salem et al., 2010)
- Proceso KDV. KDV, un acrónimo alemán para Katalytische Drucklose Verölung o “proceso de despolimerización sin presión catalítica”, fue desarrollado por la empresa alemana Alphakat GmbH y convierte los residuos plásticos en combustibles líquidos a casi la presión atmosférica. La ventaja de los productos de este proceso es la eliminación casi completa de los átomos de oxígeno, haciendo el combustible líquido final directamente aplicable en la combustión convencional. Esta tecnología permitiría obtener aceite diésel, queroseno y petróleo de todos los tipos de sustrato que contienen hidrocarburos tanto de origen orgánico como mineral (Ragaert et al., 2017).
- Gasificación. Consiste en una serie de reacciones termoquímicas en las que por medio de un agente gasificante como aire, oxígeno o vapor de agua, se obtiene un gas con gran potencial calorífico, como el monóxido de carbono y el hidrógeno que se usan para producir metanol (Ragaert et al., 2017).

### **2.5.3 Reciclaje térmico o de recuperación de energía**

Por definición, la recuperación de energía implica la quema de residuos para producir energía en forma de calor, vapor y electricidad (Al-Salem et al., 2009). La recuperación de energía es una alternativa para los residuos ricos en plástico que no se pueden reciclar de forma sostenible, las plantas modernas que utilizan residuos plásticos junto con otras fuentes de aportación calorífica, pueden generar calor y energía para satisfacer hasta el 10 % de las necesidades energéticas de algunos países de Europa (PlasticsEurope, 2018). Como consecuencia de esta forma de reciclaje se percibe el riesgo de contaminación por la incineración del plástico debido a la emisión de contaminantes como dióxido de carbono

(CO<sub>2</sub>), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>); también es conocida por generar compuestos volátiles como humo (material particulado), metales pesados, hidrocarburos aromáticos policíclicos, dibenzofuranos policlorados y dioxinas. Sustancias cancerígenas también han sido identificadas en partículas en el aire por incineración de polímeros sintéticos como PVC, PET, PS y PE. (Hopewell et al., 2009).

#### 2.5.4 Degradación de polímeros

La degradación es una técnica muy útil, aunque no la ideal, juega un papel importante en el reciclaje de los polímeros. La degradación no es más que cambios en las propiedades físicas y químicas del polímero, estas propiedades dependen de la naturaleza, su composición y la magnitud de las fuerzas intra o intermoleculares (Bhuvanewari. G, 2018). A continuación, se describen los factores que influyen en la degradación de los polímeros.

- Degradación térmica. Corresponde al deterioro molecular causado por el sobrecalentamiento del polímero (Beyler & Hirschler, 2002). En el proceso ocurren 2 reacciones simultáneamente, una es la ruptura de la cadena de forma aleatoria causando reducción del peso molecular, y la otra es la división de los enlaces finales de la cadena, lo que causa la generación de productos volátiles (Murata et al., 2002).
- Degradación química. Se define como la despolimerización completa del polímero a los monómeros, o despolimerización parcial a oligómeros y otras sustancias químicas. De acuerdo al reactivo utilizado en la degradación química, se puede clasificar de la siguiente forma (Bhuvanewari. G, 2018): (a) hidrólisis, implica la despolimerización mediante la adición de agua, (b) alcoholisis, es la degradación por la acción de un catalizador y un alcohol de bajo peso molecular. (c) Acidólisis, es la degradación de polímeros mediante el uso de ácidos, (d) glicólisis, implica el uso del disolvente glicol, (e) aminólisis, la reacción se da por el uso de amoniacó o alcalonaminas.
- Degradación mecánica. La degradación mecánica implica la degradación de los polímeros por tensiones o fuerzas mecánicas. Se da de 4 formas diferentes (Bhuvanewari. G, 2018): (a) rectificación o pulverización, consiste en moler los

polímeros hasta obtener polvo, (b) prensado adhesivo, este método consiste en cubrir las partículas de la superficie del polímero con adhesivo aglutinante y se unen por medio de una prensa caliente, (c) moldeo por compresión, es un método que involucra el moldeo bajo altas temperaturas y presión sin utilizar aglutinantes, (d) moldeo por inyección, es un método de procesamiento y mezcla de polímeros, es el método preferido actualmente.

- Fotodegradación. Es la degradación causada por la absorción de fotones, particularmente las longitudes de onda que se encuentran en la luz solar, como la radiación infrarroja, luz visible y luz ultravioleta (Yousif & Haddad, 2013). Este proceso se puede dar de forma natural cuando los polímeros quedan expuestos a la luz solar, o de forma artificial en el laboratorio involucrando el uso de luz artificial (B. Singh & Sharma, 2008).
- Biodegradación. La biodegradación es una transformación bioquímica de los compuestos de un polímero, esta depende del origen del polímero, de su estructura química y las condiciones ambientales degradantes (Bhuvaneswari. G, 2018), en consecuencia, existen 5 mecanismos de biodegradación cuyas principales características se pueden observar en la tabla 5.

Tabla 5: Mecanismos de biodegradación

<b>Mecanismo</b>	<b>Forma de biodegradación</b>
<b>Solubilización</b>	Se produce la hidratación del polímero, lo que provoca que las cadenas del polímero se vuelvan solubles en agua, así la base del polímero puede ser separado por químicos o por hidrólisis
<b>Ionización</b>	Algunos polímeros que son insolubles en agua se solubilizan por ionización.
<b>Hidrólisis</b>	Los polímeros insolubles en agua que contienen grupos anhídrido o éster pueden solubilizarse si el anhídrido o los ésteres se hidrolizan para formar ácidos

<b>Hidrólisis catalizada por enzimas</b>	Las enzimas funcionan como catalizadores para obtener una serie de reacciones como oxidación, reducción, hidrólisis, esterificación o síntesis moleculares
<b>Degradación microbiana</b>	Esta degradación se produce la acción de microorganismos naturales como bacterias, hongos, algas, entre otros.

Fuente. Elaboración propia a partir del documento Mechanistic implications of plastic degradation (B. Singh & Sharma, 2008).

## 2.6 Procesos para la recuperación de microplásticos

El aumento de residuos plásticos representa un grave problema medioambiental. El consumo de plásticos sigue creciendo y, si bien el reciclaje de plástico ha experimentado un aumento significativo desde principios de la década de 1990, el consumo aún supera al reciclaje. Sin embargo, los residuos plásticos pueden servir como un recurso potencial y, con el tratamiento correcto, pueden reutilizarse o servir como materia prima de hidrocarburos o como combustible (Keane, 2010), sin embargo, la eliminación de microplásticos del agua aún es difícil debido a las características físicas y químicas propias del plástico por lo que existen pocos estudios sugieren tecnologías de tratamiento avanzadas (Tofa, Ye, et al., 2019), en los siguientes apartados se exponen estas tecnologías.

### 2.6.1 Fotodegradación

La degradación es un proceso de ruptura de enlaces, seguido de una transformación química que cambia las propiedades del polímero (Poerio et al., 2019). En esta, una molécula se degrada a causa de la absorción de fotones provenientes de longitudes de onda que se encuentran en la luz solar, como la radiación infrarroja, la luz visible y la luz ultravioleta. La fotodegradación incluye cambios irreversibles en la molécula, como la desnaturalización de proteínas y la adición de otros átomos o moléculas y la fotodisociación que es la ruptura de moléculas en pedazos más pequeños (Tofa, Ye, et al., 2019). Para que

la fotodegradación sea eficaz, la luz debe ser absorbida por el sistema polimérico, por lo tanto, la existencia de grupos cromóforos en las macromoléculas es un requisito previo para el inicio de cualquier reacción fotoquímica, estos cromóforos pueden provenir de (1) impurezas internas que se introducen durante el proceso de polimerización o almacenamiento e incluyen: hidroperóxido, carbonilo, enlaces insaturados (C=C) o residuo de catalizador; o (2) impurezas externas como: trazas de disolventes, catalizadores, smog, hidrocarburos polinucleares como naftaleno y antraceno en polipropileno y polibutadieno, aditivos, rastros de metales y óxidos metálicos de equipos y contenedores de procesamiento, como Fe, Ni o Cr (Yousif & Haddad, 2013).

Una amplia variedad de polímeros sintéticos y naturales absorben la radiación ultravioleta solar y sufren reacciones fotolíticas, fotooxidativas y termooxidativas que provocan la degradación de la materia (Yousif & Haddad, 2013). la radiación UV causa una degradación fotooxidativa que provoca la ruptura de las cadenas de polímeros, produce radicales y reduce el peso molecular, provocando el deterioro de las propiedades mecánicas y dando lugar a materiales inútiles, después de un tiempo impredecible (Bottino et al., 2004). La exposición a la radiación ultravioleta UV es comúnmente la razón principal de la decoloración de los tintes y pigmentos, el amarillamiento de los plásticos, la pérdida de brillo y las propiedades mecánicas (Yousif & Haddad, 2013).

Por otro lado, se ha demostrado que la degradación catalítica foto-mediada, es un proceso energéticamente eficiente para degradar los microplásticos en el agua, en donde el fotocatalizador juega un papel importante para acelerar el proceso de degradación, lo que conduce a la rotura de la cadena polimérica (Tofa, Kunjali, et al., 2019). Los nanomateriales como el óxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) poseen alta capacidad para degradar fotocatalíticamente microplásticos, debido a su alta actividad fotocatalítica. El óxido de zinc nanoestructurado ( $\text{ZnO}$ ), se ha utilizado en tratamientos de aguas residuales por la alta movilidad de electrones a temperatura ambiente y mejor rendimiento catalítico. El platino puede mejorar la eficiencia fotocatalítica general debido a la absorción de luz visible (Tofa, Ye, et al., 2019).

### 2.6.2 Bioreactor de membrana

Un biorreactor de membrana (BM) combina el proceso de lodo activado con un proceso de separación de membrana. La filtración por membrana de baja presión se utiliza para separar el efluente del lodo activado. Las dos configuraciones principales del BM involucran membranas sumergidas o de circulación externa, siendo los BM sumergidos los que se emplean con mayor frecuencia en el tratamiento de aguas residuales (Melin et al., 2006). En un BM sumergido, las membranas microporosas se sumergen en un biorreactor y el agua se filtra a través de las membranas usando vacío; los sólidos suspendidos se retienen en el sistema y se pueden lograr altos niveles de tratamiento.

El BM reemplaza las dos etapas del proceso convencional de lodos activados (biotratamiento y clarificación) con un único proceso integrado. El efluente de BM puede ser adecuado para su uso como agua de riego, agua de proceso o con tratamiento adicionales como fuente de agua potable (Achilli et al., 2009).

Investigaciones recientes informan que el BM puede lograr una eliminación de hasta el 99.9% de los microplásticos debido a la capacidad de retención superior de la membrana, esto sugiere que el BM es una solución prometedora para los problemas de contaminación microplástica (Xiao et al., 2019).

Las ventajas de los BM sobre el tratamiento convencional incluyen la consistencia y más alta calidad del efluente, la huella reducida, la producción reducida de lodos y la eliminación completa de sólidos suspendidos del efluente; dentro de las principales desventajas se incluye que es relativamente caro de instalar y operar, requiere un monitoreo y mantenimiento frecuente de membranas debido a la suciedad que queda atrapada y a los daños que pueden ocasionar ciertos químicos y limitaciones debido a las tolerancias de la membrana en cuanto a presión y temperatura (Achilli et al., 2009; Melin et al., 2006).

### 2.6.3 Degradación bacteriana

Las bacterias son un grupo importante de microorganismos, son los más abundantes y se han conocido por su capacidad para degradar los contaminantes (Bakir et al., 2014). Durante la degradación del polímero, los microbios se adhieren a la superficie del polímero exponiéndose así a la colonización microbiana, la colonización de polímeros es seguida por la secreción de enzimas extracelulares que se unen al polímero y causan la escisión hidrolítica, posteriormente el polímero se degrada en polímeros de bajo peso y se mineraliza en dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ), que el microbio utiliza como fuente de energía (Auta et al., 2017).

En la actualidad, numerosos estudios han investigado el uso de bacterias para la degradación de MP y se ha identificado un número creciente de cepas bacterianas que pueden degradar los MP, y sus propiedades de degradación y sus efectos sobre los MP están siendo ampliamente estudiados (Yuan et al., 2020). Algunas de las bacterias estudiadas en los procesos de degradación de MP son: rhodococcus, bacillus, bacillus cereus, bacillus gottheilii, stentrophomonas maltophilia, enterobacter asburiae, entre otras, y los tipos de plástico que se logran degradar son: PE, PP, PET, PS y PLA (Yuan et al., 2020).

Una investigación estudió la eliminación de diferentes MP por dos tipos de cepas bacterianas de bacillus presentes en los sedimentos de manglares, bacillus cereus y bacillus gottheilii (Padervand et al., 2020). En este estudio se escanearon los cambios morfológicos y estructurales mediante microscopía electrónica y se evaluó la tasa de biodegradación midiendo la pérdida de peso de los microplásticos, se encontró la reducción de masa más rápida (0,0019 / día) y el tiempo de degradación más corto (363,16 días) utilizando bacillus cereus y microplásticos de poliestireno, mientras que bacillus gottheilii en polietileno dio 0,0016 / día y 431,25 días. Al comparar los resultados de degradación, rupturas de enlaces y alteraciones químicas, bacillus gottheilii resultó ser el mejor degradador potencial de microplástico (Padervand et al., 2020).

#### 2.6.4 Eliminación por medios físicos o mecánicos

Existen varios métodos de eliminación de MP por medios físicos que se emplean en las PTAR, en la fase de tratamiento primaria se emplean: la eliminación por el método de separación por densidad de los microplásticos ligeros flotantes y el asentamiento de los microplásticos pesados o microplásticos atrapados en flóculos sólidos durante la eliminación de la arena y la separación por gravedad en los clarificadores primarios, en esta fase se pueden eliminar efectivamente la mayoría de los microplásticos en las aguas residuales, entre el 35% y el 59% (Sun et al., 2019).

Estudios muestran que estos métodos pueden eliminar de manera más efectiva las fibras que los fragmentos, esto probablemente podría deberse a que las fibras quedan atrapadas más fácilmente en partículas de floculación y se separan por sedimentación (Ziajahromi et al., 2017). Las microperlas también se eliminan de manera más efectiva mediante la separación por densidad, ya que la mayoría de estas microperlas están hechas de PE que flotaba en el agua (Murphy et al., 2016).

El método de clarificación o coagulación se emplea en la fase secundaria de tratamiento, en ésta se emplean productos químicos como el sulfato férrico que actúa sobre las partículas en suspensión para formar los flóculos que se asentarán de manera más eficiente (coagulación), este método elimina más partículas que fibras logrando reducir los MP entre 0.2% y el 14%. En el tratamiento terciario los MP se reducen entre 0.2% y 2%, en esta fase se emplean métodos como filtro de disco, filtración de arena rápida y flotación por aire disuelto (Sun et al., 2019), los 2 últimos logrando la eliminación de MP de cualquier tamaño, incluso partículas entre 20 y 100  $\mu\text{m}$  (Padervand et al., 2020).

#### 2.6.5 Métodos químicos

Se refiere exclusivamente a procesos que son inducidos bajo la influencia de reactivos químicos, por ejemplo, ácidos, bases, solventes, gases reactivos, entre otros (Yousif &

Haddad, 2013). Muchas plantas de tratamiento de aguas residuales utilizan procesos de coagulación y aglomeración para formar partículas contaminantes agrandadas que son más fáciles de manipular (Shirasaki et al., 2016), estos procesos involucran sales a base de Fe y Al y otros coagulantes para unir partículas diminutas a través de mecanismos de absorción iniciados por un intercambio de uniones, formando así fuertes enlaces entre partículas (Chorghe et al., 2017).

En un reciente estudio, se identificó que la eficiencia de eliminación de los microplásticos disminuye al aumentar el PH, y que la poliacrilamida (PAM), un agente mejorador de la coagulación, aumentaba la eficiencia de eliminación de los microplásticos pequeños mucho mejor que de las partículas grandes con una dosis alta de Al de 5 mm (Ariza-Tarazona et al., 2019).

### **2.6.6 Degradación por procesos catalíticos**

La mejora de un proceso químico con respecto al alto rendimiento, selectividad y pureza del producto a menudo requiere el desarrollo de nuevos catalizadores y reactivos, de esta forma, la ingeniería de procesos tiende a mejorar la eficiencia de una síntesis química, así, la investigación sobre técnicas eficientes de separación de productos y catalizadores reciclables cumple con los principios de una Química Verde sostenible (Herberg et al., 2019).

Teniendo como base lo mencionado anteriormente, la degradación por procesos catalíticos consiste en la degradación de polímeros bajo la acción de calor usando catalizadores que incrementan la velocidad de degradación. La degradación catalítica proporciona control sobre la composición y distribución del producto y sirve para reducir significativamente la temperatura de degradación (Keane, 2010). Algunos de los catalizadores más empleados se describen en la siguiente tabla.

Tabla 6: Catalizadores empleados en la degradación de microplásticos

Catalizador	Descripción
<b>Zeolitas</b>	Es el catalizador más empleado. Las zeolitas son aluminosilicatos que estructuralmente únicos porque tienen poros con dimensiones moleculares como parte de su estructura cristalina, se encuentran naturalmente como minerales, su estructura está compuesta de tetraedros de oxígeno, cada uno de los cuales contiene un átomo de Si, Al o P. También llamadas tamices moleculares, ofrecen selectividad de forma debido a su tamaño de poro al ofrecer acceso a los sitios reactivos solo a moléculas selectivas y al crecimiento de productos finales dentro del poro. Permite la optimización de las fracciones de productos de hidrocarburos mediante la elección las condiciones óptimas de operación: temperatura de reacción y configuración del reactor. Empleadas en la pirólisis de PE, PP, PEAD y PEBD como producto final se obtienen ceras y destilados medios (gasoil, gasolina) o hidrocarburos ligeros (olefinas).
<b>Acetato de Zinc</b>	Catalizador en la glucólisis para degradación del PET, en este proceso se obtiene bis (hidroxietil) tereftalato monomérico (BHET) o sus homólogos oligoméricos.
<b>TiO<sub>2</sub> Óxido semiconductor con potencial fotocatalítico</b>	Fotodegradación de microplásticos de PEAD extraídas de exfoliantes faciales, en un proceso verde utiliza las proteínas del mejillón como fuente de nitrógeno. En un ambiente húmedo favorece la generación de especies reactivas OH, lo que favorece el proceso de fotodegradación. El TiO <sub>2</sub> /CuPc muestra propiedades potenciales hacia la degradación de PS en comparación con TiO <sub>2</sub> puro. TiO <sub>2</sub> acompañado de Fe y Ag se emplea para la degradación de películas de PE.

<b>Metales como Fe, Co, Mn y sus óxidos</b>	Son excelentes activadores para las sales de persulfato en la producción de radicales de sulfato durante el proceso catalítico para la eliminación de contaminantes orgánicos e inorgánicos.
<b>Nanomateriales de carbono</b>	Recientemente surgieron como alternativas libres de metales y se aplicaron para la activación de sales de persulfato en la degradación catalítica de microplásticos.
<b>Sílice-alúminas</b>	Permite la optimización de las fracciones de productos de hidrocarburos mediante la elección las condiciones óptimas de operación: temperatura de reacción y configuración del reactor. Degradación de PE y PP.
<b>Líquido iónico</b>	Utilizado en la glucólisis de PET, puede reemplazar potencialmente los disolventes orgánicos tradicionales utilizados para degradar el PET, el principal beneficio de usarlos como catalizadores es su fácil eliminación de los productos finales y su utilización repetitiva.
<b>Catalizadores a base de Fe</b>	Empleados en la dechloración catalítica para eliminar el contenido de Cl como HCl en el PVC, este es el primer paso para de degradación del PVC por la toxicidad del Cl.
<b>Silicato de Níquel y Silicato Ferroso</b>	Catalizadores para la pirólisis en la fase de vapor, a partir de PVC y PET, el proceso da como resultado la producción de combustible a escala industrial.
<b>Sales de persulfato</b>	Se han aplicado para producir especies reactivas de oxígeno (ROS) y radicales hidroxilo para la oxidación avanzada.
<b>Octoato de Estaño o Dilaurato de Dibutil Estaño</b>	Catalizadores más utilizados en la glucólisis

Elaboración propia a partir de diversos documentos (Kang et al., 2019; Keane, 2010; Mansour et al., 2020; Pohjakallio et al., 2020; Sheel & Pant, 2019; R. Singh et al., 2020; Zhou et al., 2018)

## 2.7 Composición del Microplástico

Los plásticos son polímeros sintéticos hechos de una amplia gama de compuestos químicos con diferentes características cada uno (Hidalgo-Ruz et al., 2012). Hasta ahora, se han detectado más de 30 tipos de polímeros microplásticos en influentes y efluentes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR). Los polímeros más comunes encontrados en los afluentes y efluentes de las PTAR se relacionan en la siguiente tabla.

Tabla 7: Caracterización de los microplásticos presentes en afluentes y efluentes de las PTAR

Tipo de polímero	Cantidad	Origen principal	Densidad
<b>PES</b>	Entre 28% y 89%,	Ropa sintética	Entre 1,02 y 2,3 g/cm <sup>3</sup>
<b>PE</b>	Entre 4% y 51%,	Productos de cuidado personal, exfoliantes, películas para envasado de alimentos y botellas de agua	Entre 0,92 y 0,97 g/cm <sup>3</sup>
<b>PET</b>	Entre 4% y 35%	Ropa sintética	
<b>PA</b>	Entre 3% y 30%	Ropa sintética	Entre 1,02 y 2,3 g/cm <sup>3</sup>
<b>PP</b>	Entre 5% y el 27 %,	Envases, pitillos y cintas para empacar	Entre 0,90 y 0,91 g/cm <sup>3</sup>
<b>PS</b>	Entre 5% y el 27 %,	Cubiertos plásticos	Entre 1,02 y 2,3 g/cm <sup>3</sup>
<b>PVC</b>	Entre 5% y el 27 %,	Mangueras y tuberías	Entre 1,02 y 2,3 g/cm <sup>3</sup>
<b>Otros</b>	< 5%		

Elaboración propia a partir de diferentes autores (Hidalgo-Ruz et al., 2012; Lares et al., 2018; Sun et al., 2019).

Diversos estudios reportan la presencia de MP tanto en el agua de mar como en sedimentos y la composición de estos MP hace referencia a PE, PP, PS, PES, PVC, poliamida (PA), acetato de polivinilo (PVA) y otros, siendo el PE el polímero dominante, seguido de PP y PS (Shim et al., 2018). Las densidades de los diferentes polímeros varía (Hidalgo-Ruz et al., 2012), los MP menos densos como PP, PP y PS, son realmente menos densos que el agua de mar y pueden flotar por lo que predominan en aguas superficiales y playas.

Por el contrario, otros polímeros más pesados como PS, PVC, PES y PA, se hunden en el mar, excepto cuando se expanden y contienen espacio aéreo vacío, a menudo son dominantes en la columna de agua y los sedimentos submareales. Cada tipo de polímero muestra diferentes comportamientos ambientales de acuerdo con sus características fisicoquímicas y de acuerdo con la velocidad de degradación, los productos químicos aditivos y las interacciones con productos químicos y la biota. Además, la composición de polímero puede proporcionar información adicional sobre su fuente (Shim et al., 2018).

## **2.8 Procesos verdes aplicados a microplásticos**

Antes de hablar de los procesos verdes, se debe hablar de los conceptos de la química verde, cuyo énfasis es que tanto el producto como el proceso utilizado para producirlo deben ajustarse a las reglas básicas de sostenibilidad y consiste en utilizar eficientemente materias primas (preferiblemente renovables), eliminar desperdicios y evitar el uso de reactivos y solventes tóxicos o peligrosos en la fabricación y aplicación de productos químicos. La química verde se rige bajo 12 principios fundamentales publicados por primera vez en 1998 por Anastas y Warner (Sheldon & Norton, 2020; Török & Dransfield, 2018):

1. Prevención: es mejor prevenir los desechos que tratar o limpiar los desechos después de que se hayan creado.
2. Economía del átomo: los métodos sintéticos deben diseñarse para maximizar la incorporación de todos los materiales utilizados en el proceso en el producto final.

3. Materiales menos peligrosos: siempre que sea posible, los métodos sintéticos deberían diseñarse para utilizar y generar sustancias que posean poca o ninguna toxicidad para la salud humana y el medio ambiente.
4. Diseño de productos químicos más seguros: los productos químicos deben diseñarse para afectar su función deseada y minimizar su toxicidad.
5. Disolventes y auxiliares más seguros: el uso de sustancias auxiliares (por ejemplo, disolventes, agentes de separación, etc.) debe hacerse innecesario siempre que sea posible e inocuo cuando se utilice.
6. Diseño para la eficiencia energética: los requisitos energéticos de los procesos químicos deben reconocerse por sus impactos ambientales y económicos y deben minimizarse. Si es posible, los métodos sintéticos deben realizarse a temperatura y presión ambientales.
7. Uso de materias primas renovables: la materia prima debe ser renovable siempre que sea técnica y económicamente viable.
8. Reducir derivados: la derivatización innecesaria (uso de grupos bloqueadores, protección / desprotección, modificación temporal de procesos físico-químicos) debe minimizarse o evitarse si es posible.
9. Reactivos catalíticos: los reactivos catalíticos son superiores a los reactivos estequiométricos.
10. Diseñar para la degradación: los productos deben diseñarse de modo que al final de su función se descompongan en productos de degradación inocuos y no persistan en el medio ambiente.
11. Análisis en tiempo real para la prevención de la contaminación: las metodologías analíticas deben desarrollarse más para permitir la supervisión y el control en tiempo real durante el proceso antes de la formación de sustancias peligrosas.
12. Procesos intrínsecamente más seguros para la prevención de accidentes: las sustancias utilizadas en un proceso químico deben elegirse para minimizar el potencial de accidentes químicos, incluidos escapes, explosiones e incendios.

Los procesos verdes son tecnologías ecológicas que disminuyen el daño ecológico resultante de los productos y la tecnología que se ha creado para proporcionar comodidades al ser humano, éstos pueden mejorar el entorno junto con el re-uso de desechos, la eficiencia energética y el reciclaje (Naushad et al., 2020). Las tecnologías más importantes utilizadas en la actualidad, como la tecnología espacial, la tecnología de Internet, la tecnología de las aeronaves y del automóvil, la tecnología informática, la tecnología de las energías renovables, la biotecnología, la nanotecnología, la tecnología de las telecomunicaciones, entre otras, se pueden hacer ecológicas utilizando los principios de procesos verdes (Guoliang, 2011).

La adopción y el uso de procesos verdes incluyen la disuasión, gestión, remediación y renovación de residuos tóxicos. Los procesos de disuasión evitan la fabricación de materiales peligrosos para el medio ambiente, los procesos de gestión se ocupan de aquellos elementos peligrosos que penetran en el entorno y los procesos de remediación y restablecimiento son métodos para mejorar la condición de ecosistemas afectados por elementos antropogénicos (Naciones Unidas, 2003).

El proceso verde para la gestión de aguas residuales se refiere al proceso de eliminar los contaminantes y componentes indeseables en aguas domésticas, industriales y contaminadas para devolverlas de manera segura al medio ambiente. Básicamente, se emplean varios pasos durante cualquier proceso de tratamiento de aguas residuales. El primero consiste en separar los sólidos del agua líquida, esto se logra mediante la gravedad, ya que los sólidos son más pesados que el agua líquida.

Posteriormente, las aguas residuales se someten a procesos de filtración para eliminar las suspensiones de sólidos finos, partículas químicas e impurezas. El agua filtrada resultante finalmente se expone a la oxidación en el camino para recortar o erradicar la toxicidad de cualquier residuo nocivo restante y desinfectar las aguas residuales antes de liberarlas al medio ambiente (Naushad et al., 2020).

### 2.8.1 Biorreactor de membrana

La tecnología de biorreactor de membrana (BM) se basa en la matriz de manejo de fango activado junto con la acción de filtración por una membrana con un volumen de poro entre 10 nm y 0.4 micrones (micro / ultra filtración), que permite la división del fango. La membrana es un obstáculo que retiene todas las partículas, además, puede operar a concentraciones de fango mayores (hasta 12 g/l), lo que reduce significativamente el volumen de los reactores y la formación de fango. Aunque actualmente hay dos configuraciones de procedimientos principales de BM, flujo lateral y bajo el agua o absorbido, la configuración absorbida es la más utilizada en las soluciones de aguas residuales comunitarias debido al menor costo de operación (Melin et al., 2006).

Aquí, el componente está ubicado directamente en el depósito de proceso y, por lo tanto, consume menos energía. En la configuración absorbida, se pueden obtener principalmente dos tipos de módulos de membrana: láminas planas y fibras huecas. Las fibras huecas permiten una mayor densidad de empaquetamiento debido a los espacios más delgados entre las membranas en comparación con las hojas planas. No obstante, esto lo hace aún más vulnerable a la congestión de la membrana y a la sedimentación. (Naushad et al., 2020).

### 2.8.2 Membrana de filtración

Implica el correr de agua que contiene impurezas a través de una membrana. El agua corriente penetra a través de la membrana, debido a la recolección por el flujo cruzado de agua y los MP, estos últimos salen del sistema para una recuperación o eliminación. Las membranas se construyen con fibra u otra materia polimérica, es necesario que las membranas permitan el paso de partículas del tamaño de microorganismos, aproximadamente 1 micra (0,001 milímetros). En el tema de la permeabilidad, se ha establecido una correlación de la pérdida de permeabilidad y el tiempo de operación, demostrando que la permeabilidad de la membrana deja de ser funcional a partir de los 7 años de operación (Delgado et al., 2011).

### 2.8.3 Oxidación por aire húmedo

En este proceso los desechos acuosos se oxidan en la fase líquida a altas temperaturas (400–573 K) y presiones (0.5–20 MPa) en presencia de un gas que contiene oxígeno (generalmente aire). Esta tecnología consiste en técnicas de transferencia de calor y el uso de catalizadores tanto homogéneos como heterogéneos para mejorar la velocidad de reacción. Por lo general, cuanto mayor es el calor, mayor es el nivel de oxidación alcanzado, y el requisito de presión asociado es esencial para mantener el estado fluido. La presión limitada de oxígeno y el tiempo de exposición también son cruciales para el grado de oxidación. El tiempo de exposición puede variar de segundos a horas dependiendo del tipo de material a oxidar (Naushad et al., 2020).

### 2.8.4 Polimerización enzimática

La polimerización enzimática ha sido ampliamente estudiada y desarrollada como un nuevo método de síntesis de polímeros. Es una reacción de polimerización que utiliza una enzima como catalizador (iniciador), y se definió como la “síntesis química de polímeros in vitro (en tubos de ensayo) a través de rutas no biosintéticas catalizadas por una enzima aislada (Kobayashi et al., 2001). La polimerización enzimática se considera un poderoso método de síntesis de polímeros para realizar la química del polímero verde. Implica muchos aspectos ecológicos ventajosos relacionados con procesos limpios, selectividad de reacción, ahorro de energía, problemas de recursos naturales y renovables, emisión de dióxido de carbono, entre otros, a continuación se describen estos aspectos (Kobayashi et al., 2019):

- La enzima es un catalizador natural renovable no tóxico, que en la mayoría de los casos no contiene metales. La actividad catalítica es muy alta incluso in vitro. Una enzima inmovilizada puede recuperarse y usarse repetidamente.
- Las reacciones catalizadas por enzimas normalmente se desarrollan en condiciones leves: a una temperatura más baja, a pH aproximadamente neutro, a presión normal, etc. La velocidad de estas reacciones es muy grande. Además, las reacciones dan un

sistema de reacción limpio con producción nula o mínima de subproductos. Estas ventajas contribuyen al ahorro de energía por todos los medios y normalmente son difíciles de lograr mediante reacciones catalíticas convencionales.

- Las polimerizaciones enzimáticas pueden utilizar muchos materiales de base biológica renovables como sustratos en lugar de materias primas de base fósil, incluyen materiales como celulosa, amilosa, lignina, aceite vegetal, ácido láctico, ácido sebácico, varios ácidos grasos, 1,4-butanodiol, sorbitol, glicerol, entre otros. Todos estos productos químicos se derivan de maíz, trigo, caña de azúcar, mandioca, pasto, algunos animales, etc. El uso de materias primas renovables está de acuerdo con el concepto de "carbono neutral" para no aumentar la emisión de dióxido de carbono. Además, se pueden emplear reactivos ambientalmente neutros como agua, oxígeno, peróxido de hidrógeno, dióxido de carbono, etc.
- La polimerización enzimática crea nuevos polímeros que no se producen mediante métodos convencionales, los polímeros de productos de biomasa no son tóxicos y casi todos son biodegradables.
- Las reacciones enzimáticas a veces son lo suficientemente robustas como para llevarse a cabo tanto en solventes orgánicos como en solventes verdes, como agua, dióxido de carbono supercrítico y líquidos iónicos, o en otros solventes verdes.
- El grupo éster es relativamente fácil de formar y romper enlaces, se propuso un nuevo método de reciclaje químico de poliésteres mediante catálisis de lipasa. El principio radica en que el sistema de polimerización por apertura de anillo de las lactonas por catálisis de lipasa es reversible entre polímeros lineales y oligómeros cíclicos, que se pueden controlar cambiando las condiciones de reacción. Un método de flujo continuo que combine la degradación y la polimerización debe ser una buena forma de reciclado químico. La cutinasa es una hidrolasa de poliéster que muestra la capacidad de hidrolizar el tereftalato de polietileno (PET) a sus unidades monoméricas.
- Los comportamientos de degradación enzimática de polisacáridos como la celulosa por celulasa y la quitina por quitinasa, así como varios polímeros y copolímeros de nailon por nailon hidrodasa, están bien estudiados utilizando microscopía de fuerza

atómica de alta velocidad y espectrometría de masas iónica de grupos de gases en segundo lugar. Estos resultados implican una posible aplicación de la degradación enzimática de la biomasa a los desarrollos de biocombustibles, la fabricación de fibras y el reciclaje de poliésteres.

## **2.9 Procesos verdes en torno al agua y la energía**

Los ecosistemas y los seres vivos dependemos del agua, ésta proporciona el 75% de la energía renovable del mundo, y una proporción similar de agua se usa en la producción de alimentos. (UNESCO, 2019). El uso del agua a nivel mundial aumenta un 1% anual desde los años 80, esto debido al aumento de la población, el desarrollo socioeconómico y cambio en las formas de consumo. Para 2050 se espera un incremento del 20 al 30% de uso del agua por encima del nivel actual, ocasionado principalmente por el aumento de la demanda en los sectores industrial y doméstico (UNESCO b, 2019).

Existe un amplio campo para poder economizar un volumen considerable en la agricultura, en la industria, y en el abastecimiento para uso doméstico. Actualmente hay una creciente preocupación por la escasez del líquido vital, para hacer frente a este desafío es fundamental contar con un sistema de gestión del agua eficaz (M. Singh & Ahmed, 2020). A nivel industrial un plan para ahorrar agua funciona mejor cuando la organización incorpora enfoques técnicos y pone la gestión sostenible del agua en el contexto del enfoque general como organización hacia la responsabilidad social y ambiental (Seneviratne, 2006). La gestión del agua está enfocada a un uso sostenible del agua, cuyo objetivo es la preservación y recuperación de la calidad.

Es necesario buscar formas de reducir el consumo de agua dulce y minimizar la descarga de contaminantes, al tiempo que se minimizan los costos de capital y operativos para hacerlo. Esto se puede hacer mediante una mejor comprensión de las formas en que se usa el agua y encontrando formas innovadoras de reducir, reutilizar, reciclar y tratar el agua para mejorar su eficiencia (Sánchez, 2021).

Una de las metodologías disponibles en la actualidad y más empleadas para el ahorro de agua es la modelación matemática con la ayuda de un software de simulación. El modelado, la simulación y la optimización asistidos por computador ahorran tiempo y dinero al reducir el esfuerzo en la configuración del trabajo experimental, logrando una mejora notable en el diseño de los procesos.

La simulación ayuda a visualizar la imagen final y el comportamiento de las condiciones de la planta existente, esto lo logra desarrollando balances de masa y calor precisos y determinando las propiedades de las corrientes para un proceso determinado, por lo tanto, se puede utilizar para dirigir los esfuerzos para reducir el consumo de agua ya que ésta es una parte integral del diagrama de flujo del proceso (Panigrahi & Sharma, 2014).

Otra metodología útil en torno al uso eficiente del agua y la energía es el análisis pinch o análisis de pellizco, éste identifica y analiza las corrientes calientes y frías de una planta y por medio de un diseño de red correcto, aprovecha las corrientes como intercambiadores de calor, logrando así:

- Cambios en el proceso para reducir la demanda de agua.
- Reutilización de agua no/poco contaminada.
- Reutilización parcial de aguas contaminadas tratadas con algún método de regeneración.
- Reciclaje por regeneración, consiste en la eliminación total de los contaminantes del agua para su reutilización.

En lo referente a los tratamientos del agua para reducir las descargas contaminantes, existen tecnologías verdes que emplean metodologías y materiales prácticos, procesos químicos no tóxicos y energías limpias, algunas de ellas son: filtración, extracción de corriente, adsorción de carbono u otros procesos similares, ajuste simple del pH y la

eliminación física de impurezas no deseadas mediante separación por membrana, extracción de agua ácida o intercambio iónico (Bui et al., 2021).

Incluso tecnologías tan novedosas y disruptivas como Internet de las cosas (IoT) y Blockchain están incursionando en los procesos de gestión del agua. IoT puede transmitir datos sin interacción humana, lo que es ideal para llevar a cabo monitoreos en tiempo real. Blockchain por su parte, además de reducir costos cuando se integra con IoT, permite crear una infraestructura pública de contratos inteligentes que representan los intereses de diferentes partes involucradas en la gestión del agua (Pincheira et al., 2021; M. Singh & Ahmed, 2020).

Por otra parte, abordando el tema de la energía, las cifras actuales indican que el sector manufacturero contribuye al 23% del consumo energético mundial, en China, el consumo de energía industrial representa incluso el 55,6% del consumo energético total nacional (Wen et al., 2021), para Colombia, la cifra del consumo de energía que corresponde al sector industrial es del 25% y se pronostica que continúe creciendo (Departamento Nacional de Planeación, 2017).

Las proyecciones de demanda de energía son una parte importante de los análisis de políticas para promover la conservación, la eficiencia, la implementación de tecnología y la producción de energía renovable (Rosenberg et al., 2013). Se puede señalar que solo en los últimos 10 años se han duplicado las demandas energéticas, mientras que los recursos energéticos actuales no cumplirían con la demanda del mercado.

Algunas novedades que aportarían para cumplir la demanda, están relacionadas con las energías renovables y sostenibles, como lo son: energía fotovoltaica y solar, energía eólica, hidrógeno, biocombustible, eficiencia energética, diseño ecológico y planificación y gestión de la energía y el medio ambiente (Olabi, 2013).

Centrándonos en el tema de la eficiencia, cabe destacar que ésta se debe asegurar en todas las etapas de la cadena energética, incluida la generación, transmisión, distribución y consumo final de energía, logrando esto, se convierte en la forma más rentable de reducir las emisiones, mejorar la seguridad energética, mejorar la competitividad y hacer que la energía sea más asequible para todos los consumidores (Malinauskaite et al., 2020).

La creciente conciencia ambiental, el aumento de los costos de la energía y las políticas más estrictas, han obligado a las empresas a repensar cómo aumentar continuamente la eficiencia energética en los sistemas de fabricación, en este contexto se han desarrollado una variedad de medidas centrándose en los avances de la tecnología de procesos, por ejemplo, la optimización de los parámetros del proceso y las mejoras impulsadas por la inversión como la selección de máquinas de eficiencia energética (Wen et al., 2021).

La inclusión de la eficiencia energética en la gestión de la producción es una ayuda importante para mejorar los sistemas de fabricación hacia la eficiencia energética (Bunse et al., 2011), además, esto ayuda a aprovechar los ahorros de energía potenciales relacionados con la gestión de la producción y las operaciones, por lo tanto, mejorar la eficiencia energética con modificaciones menores en las tecnologías existentes e inversiones de bajo costo (May et al., 2015).

## **2.10 Normativas Nacionales e Internacionales**

En este apartado se relaciona y se hace una breve descripción de la normatividad nacional e internacional con relación al manejo de los residuos, reglamentación de reciclaje, prevención y manejo de la contaminación marina. En la tabla 8 se expone la normativa nacional, principalmente en decretos y resoluciones que establecen los lineamientos para el manejo de desechos, su aprovechamiento y la reducción de residuos, en éste podemos observar un interés creciente en los últimos años en torno a la reducción en la generación de residuos plásticos y la gestión de residuos aprovechables.

Tabla 8: Normatividad Nacional en manejo de residuos, reglamentación de reciclaje, prevención y manejo de la contaminación marina

<b>Normatividad Nacional</b>	<b>Descripción</b>
<b>Ley 142 de 1994</b>	Régimen de servicios públicos domiciliarios. Aplicación de la Ley a actividades complementarias a la recolección de residuos como son el tratamiento y aprovechamiento.
<b>CONPES 2750 de 1994</b>	Política Nacional Ambiental- Salto Social hacia el Desarrollo Humano Sostenible. Se promueve un programa nacional de manejo de residuos sólidos y reciclaje.
<b>CONPES 3530 de 2008</b>	Lineamientos y estrategias para fortalecer el servicio público de aseo en el marco de la Gestión Integral de Residuos Sólidos. Se formulan los lineamientos y estrategias relacionados con la prestación del servicio público de aseo que tiene un impacto positivo en la gestión de residuos.
<b>CONPES 3874 de 2016</b>	Política nacional para la gestión integral de residuos sólidos. Base inicial para el avance hacia una economía circular desde la gestión integral de residuos sólidos
<b>Decreto 2811 de 1974</b>	Código Nacional de los Recursos Renovables y de protección del medio ambiente.
<b>Decreto 2981 de 2013</b>	Prestación del servicio público de aseo.
<b>Decreto 1076 de 2015</b>	Decreto único Reglamentario del sector ambiente
<b>Decreto 1077 de 2015</b>	Regula residuos aprovechables y no aprovechables
<b>Decreto 596 de 2016</b>	Esquema de la actividad de aprovechamiento del servicio público de aseo y el régimen transitorio para la formalización de los recicladores de oficio.
<b>Decreto 2205 de 2017</b>	Establece que las personas jurídicas tienen derecho a descontar del impuesto de renta, el 25% de las inversiones en control, conservación y mejoramiento del medio ambiente.

<b>Resolución 361 de 2011</b>	Planes de devolución de productos post-consumo
<b>Resolución 829 de 2011</b>	Establece el programa de racionalización, reutilización y reciclaje de bolsas en el Distrito Capital
<b>Resolución 754 de 2013</b>	Metodología para la formulación, implementación, evaluación, seguimiento, control y actualización de los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos.
<b>Resolución 276 de 2016</b>	Lineamientos del régimen transitorio para la formalización de los recicladores de oficio.
<b>Resolución 668 de 2016</b>	Reglamentación del uso racional de bolsas plásticas
<b>Resolución 646 de 2017</b>	Asignación de recursos al Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras - INVEMAR
<b>Resolución 1407 de 2018</b>	Reglamenta la gestión empresarial de los residuos de empaques y envases de papel, cartón, plástico, vidrio y metal.
<b>Declaración presidencial de la alianza del pacífico sobre la gestión sostenible de los plásticos</b>	Promueve la cooperación para el desarrollo sostenible y el cumplimiento de la Agenda 2030 y sus ODS.
<b>Proyecto de Ley</b>	Establece las medidas tendientes a la reducción de la producción y el consumo, de los plásticos de un solo uso en el territorio nacional y se regula un régimen de transición para reemplazar por alternativas reutilizables, biodegradables u otras cuya degradación no genere contaminación.
<b>NTC 3205</b>	Norma Técnica Colombiana para la codificación de plásticos.

Fuente. Elaboración propia a partir de normas Nacionales asociadas al manejo de residuos sólidos y plásticos y la prevención y manejo de la contaminación marina

En la tabla 9 se sintetizan las normas y acuerdos Internacionales cuyo fundamento es la protección de los océanos, el manejo de la contaminación oceánica, la protección de los medios marinos y da las bases para abordar las fuentes terrestres de contaminación.

Tabla 9: Normatividad Internacional para la protección de los océanos y conservación del medio marino

<b>Normatividad Internacional</b>	<b>Descripción</b>
<b>Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible</b>	Plan de acción que nace del compromiso de los Estados miembro de las Naciones Unidas, cuyo objetivo principal es velar por la protección de las personas, el planeta y la prosperidad.
<b>Objetivos de Desarrollo Sostenible ODS, 2015</b>	La Asamblea General de la ONU respaldó la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible y los ODS. El Objetivo 14 busca conservar y utilizar de manera sostenible los océanos, mares, y recursos y aborda explícitamente los desechos marinos.
<b>Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar (UNCLOS), 1982</b>	La UNCLOS entró en vigor en 1994 y 167 países son parte en ella. La Convención proporciona un marco jurídico para las cuestiones relacionadas con los océanos, lo que impone a los países miembro la obligación de proteger y preservar el medio marino, abordar las fuentes terrestres y marítimas de contaminación.
<b>Convención internacional para prevenir la contaminación por los buques (MARPOL), 1973/1978</b>	Ratificado por 153 países, se elaboró bajo los auspicios de la Organización Marítima Internacional (OMI). MARPOL incluye reglamentos destinados a prevenir la contaminación de los barcos, tanto accidental como la que ocurre durante las operaciones de rutina. El Anexo V de MARPOL, que entró en vigor en 2013, aborda la contaminación por desechos de origen oceánico y prohíbe la descarga de todos los plásticos de los barcos.
<b>Convenio para prevenir la contaminación del mar por vertimiento de Residuos y otras materias (Convenio de Londres), 1972</b>	Tiene como objetivo prevenir la contaminación marina regulando el vertimiento de desechos y otras materias en el mar. La convención está en vigor desde 1975, con 87 países miembro. El Protocolo de Londres de 1996 revisó

	el Convenio prohibiendo el vertido de plásticos, entró en vigor en 2006 y 45 países son parte del Protocolo.
<b>Declaración sobre Medio Ambiente y Desarrollo</b>	Adoptada en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo de 1992, conocida popularmente como la “Cumbre de la Tierra de Río”, esta declaración establece 27 principios, muchos de los cuales ahora se consideran principios del derecho ambiental internacional.
<b>Agenda 21</b>	También adoptada en la Cumbre de la Tierra de Río. La Sección II de la agenda llama a la conservación y manejo de recursos para el desarrollo, el capítulo 17 aborda la protección del océano y las áreas costeras, y señala las amenazas que plantean los desechos marinos.
<b>Programa de acción mundial para la protección del medio marino frente a las actividades realizadas en tierra</b>	Establecido en 1995, es un mecanismo intergubernamental mundial que asesora a las autoridades nacionales y regionales sobre cómo prevenir y reducir el deterioro marino causado por la contaminación y las actividades terrestres. Insta a los países a adoptar programas de acción para abordar las fuentes terrestres de contaminación.
<b>Resolución 235 de la Asamblea General de las Naciones Unidas</b>	El 23 de diciembre de 2015, la Asamblea General de las Naciones Unidas adoptó la Resolución 235 sobre los océanos y el derecho del mar, que abordó los desechos marinos e instó a los Estados a adoptar estrategias, incentivos e infraestructura

Fuente. Elaboración propia a partir de normas y acuerdos Internacionales asociados a la protección de los océanos y conservación del medio marino

## 2.11 Conclusiones preliminares

De acuerdo a los datos encontrados en la revisión de la literatura, es posible concluir que en las costas del país, principalmente en el Atlántico, existe una cantidad potencial de MP para su aprovechamiento, esto debido a que en este sector las actividades económicas asociadas al turismo y a la pesca son las principales fuentes de ingreso y de igual forma éstas son las actividades de las cuáles se deriva la mayor cantidad de MP presente en las playas.

Si la mayor presencia de MP se encuentra en las costas del Atlántico, y el PE es el tipo de plástico que se encuentra en mayor abundancia, éste puede ser el punto de partida para el planteamiento del proceso, adicionalmente, es notable que recientemente se están desarrollando múltiples procesos en torno a la recuperación y aprovechamiento del MP, lo que contribuye a tener una perspectiva más amplia y variedad de opciones para determinar la que mejor se adapte al proyecto.

También se puede concluir que la investigación relacionada con la presencia de MP en el medio ambiente se centra en las costas y hay poca evidencia de estudios realizados en el interior del país, en donde se pueden encontrar fuentes de MP en las PTAR.

Finalmente cabe resaltar que, en los últimos años en el país, la legislación cuenta cada vez con más normatividad en torno a la reducción de uso de plástico y el reciclaje, adicional a los apoyos del gobierno en la deducción de impuestos a las empresas que contribuyan en la conservación y mejoramiento del medio ambiente.

### 3 METODOLOGÍA

#### 3.1 Descripción de la Metodología

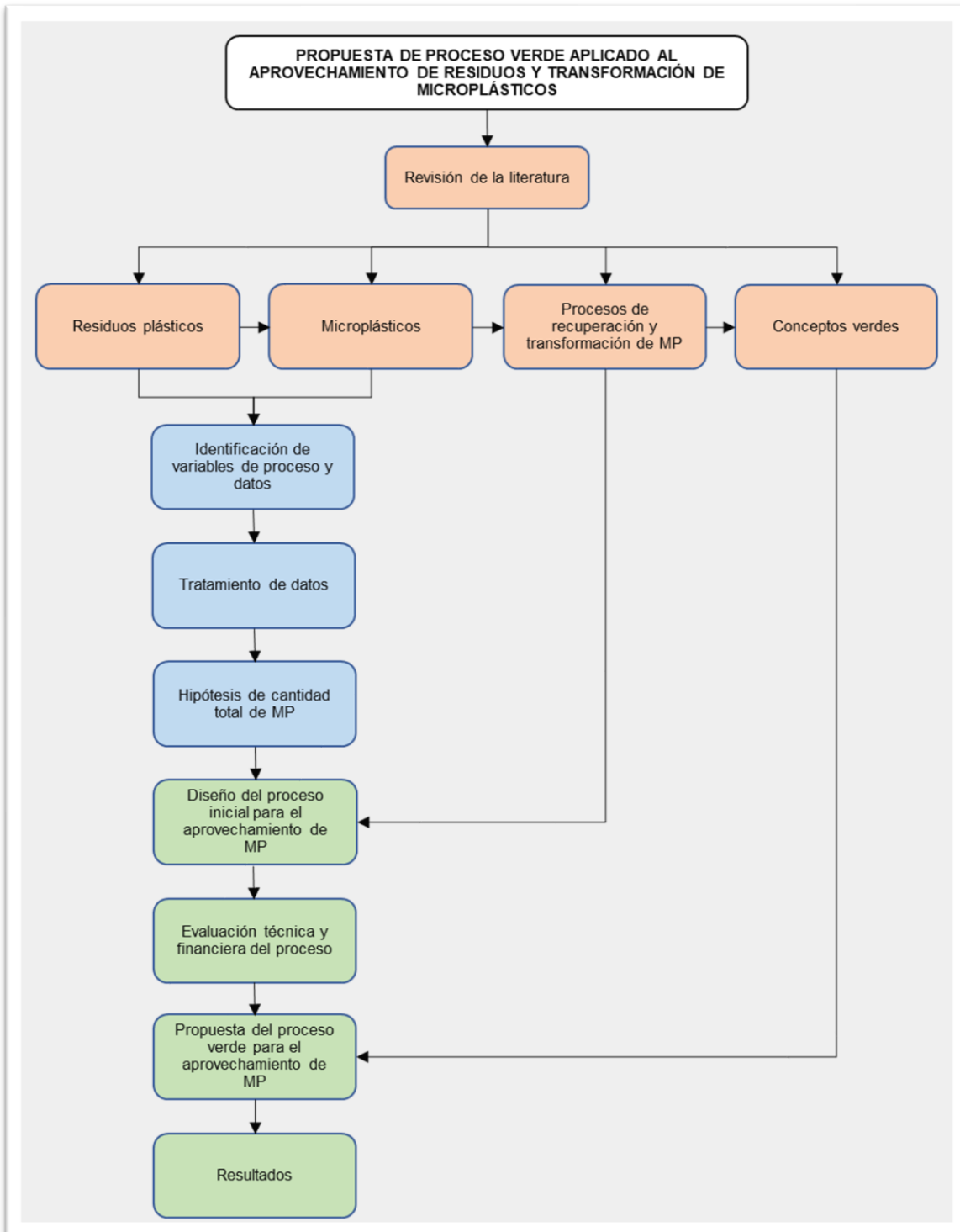
Para el desarrollo de este trabajo se lleva a cabo una investigación cuali-cuantitativa, plantea la cuantificación de MP y el análisis de sus principales características. La población incluye los resultados de investigaciones de literatura abierta, muestreo de datos de arena de playas de las costas Caribe y Pacífico, y el uso de una herramienta de geoposicionamiento para hacer el cálculo del área para determinar la cantidad potencial estimada de MP disponible en 126 playas del país.

Partiendo de la revisión bibliográfica en donde se identifican las fuentes de datos más relevantes que se obtienen de investigaciones desarrolladas en las costas del Pacífico y Caribe colombiano en donde se lleva a cabo el muestreo, conteo e identificación de los MP presentes en arena de playa. Con la información obtenida sobre la extensión de las playas del país, se plantea una hipótesis sobre la cantidad potencial de MP presente.

La información anteriormente mencionada será la base a partir de la cual se lleva a cabo el planteamiento del diseño inicial del proceso de aprovechamiento de microplásticos y su correspondiente simulación utilizando el software SuperPro Designer®. Una vez conocidos los equipos y las variables que intervienen en el proceso se desarrolla el análisis económico del mismo y se muestran los resultados obtenidos.

Posteriormente se aplicarán los principios de química verde para plantear el diseño verde del proceso y se mostrará el comparativo en relación con el proceso inicialmente planteado.

Figura 3: Metodología



Fuente. Elaboración propia

### 3.2 Identificación de variables de proceso y datos

Para determinar la cantidad potencial de MP disponible en las playas de arena del país, se tendrán en cuenta resultados de investigaciones encontradas en la revisión de la literatura, estos datos son el resultado de la toma de muestras en algunas playas del país, por lo tanto, se lleva a cabo el proceso de análisis extrapolando los datos y con la información sobre la extensión de las playas de arena, se obtiene una hipótesis sobre la cantidad total de MP presentes en las costas colombianas y su caracterización, dicha información será el insumo a partir del cual se planteará el diseño del proceso verde para el aprovechamiento de MP.

Como resultado de la revisión de la literatura se encuentran 2 investigaciones con datos relevantes para el tema de estudio y que son la base para los posteriores análisis que se llevaran a cabo, estas son: *Plastic litter pollution along sandy beaches in the Caribbean and Pacific coast of Colombia* de 2020 (Garcés-Ordóñez et al., 2020) que de ahora en adelante se llamará “Investigación 1” y *Quantification of microplastics along the Caribbean Coastline of Colombia: Pollution profile and biological effects on Caenorhabditis elegans* de 2019 (Acosta-Coley et al., 2019) que será “Investigación 2”.

La investigación 1 se llevó a cabo en 28 playas del Caribe colombiano incluyendo la isla de San Andrés, y 15 playas del Pacífico para un total de 43, de las cuáles, 44% están ubicadas en áreas urbanas y 56% en zonas rurales, y 30% del total están en áreas protegidas, el detalle se puede ver en la tabla 10. El resultado de esta investigación se expresa en cantidad de ítems de MP por m<sup>2</sup> de arena, allí se recolectan las muestras en la arena superficial (primeros 5 cm), el procedimiento detallado para la toma de muestras, su preparación, conteo y análisis se encuentra en el Anexo 1: Guía de práctica de laboratorio. El estudio arrojó un promedio de 318±314 ítems de MP/m<sup>2</sup> en las playas del Caribe y 138±125 ítems MP/m<sup>2</sup> para las playas del Pacífico (Garcés-Ordóñez et al., 2020). La forma de los MP hallados se describe en la tabla 11. Como se observa, la mayor parte de los MP encontrados tienen forma de fragmentos y la cantidad hallada con relación a las otras formas de MP no difiere entre las costas del Pacífico y Caribe o entre zonas protegidas y no protegidas.

Tabla 10: Detalle playas de estudio investigación 1

Región	Municipio	Playa	Tipo	Estado
Caribe	San Andrés	Acuario	Rural	No protegida
		Spratt Bright South	Urbano	No protegida
		Jhonny Cay	Rural	Protegida
		San Luis	Urbano	No protegida
		Spratt Bright North	Urbano	No protegida
	Santa Marta	Camellón	Urbano	No protegida
		Cristal	Rural	Protegida
		Los Cocos	Urbano	No protegida
		Nenguaje	Rural	Protegida
		Rodadero	Urbano	No protegida
		Taganga	Urbano	No protegida
	Cartagena	Blanca	Rural	Protegida
		Bocagrande	Urbano	No protegida
		Castillogrande	Urbano	No protegida
		Crespo	Urbano	No protegida
		Punta Arena	Rural	No protegida
	San Antero	Blanca	Rural	Protegida
		Manzanillo	Rural	No protegida
	Puerto Escondido	El Hoyito	Rural	No protegida
	Moñitos	Moñitos	Urbano	No protegida
	San Bernardo	San Bernardo	Urbano	Protegida
	Turbo	Dulce	Urbano	No protegida
		La Martina	Rural	No protegida
	Necoclí	Necoclí	Urbano	No protegida
		Totumo	Rural	No protegida
	Acandí	Acandí	Urbano	No protegida
		Capurganá	Rural	No protegida
	Sapzurro	Rural	No protegida	
Pacífico	Bahía Solano	Almejal	Rural	No protegida
		Bahía Solano	Urbano	No protegida

	Nuquí	Jurubidá	Rural	Protegida
		Nuquí	Urbano	Protegida
		Tribugá	Rural	Protegida
Buenaventura		Chucheros	Rural	Protegida
		Juanchaco	Rural	Protegida
		La Bocana	Rural	No protegida
		Pianguita	Rural	No protegida
		Punta Soldado	Rural	No protegida
Tumaco		Bocagrande	Rural	Protegida
		El Bajito	Urbano	No protegida
		El Morro	Urbano	No protegida
		Vaquería	Rural	Protegida
Francisco Pizarro		Pizarro	Rural	No protegida

Fuente. Elaboración propia a partir de Plastic litter pollution along sandy beaches in the Caribbean and Pacific coast of Colombia (Garcés-Ordóñez et al., 2020).

Tabla 11: Forma de los MP hallados en 43 playas de estudio

Forma de microplástico	Total playas	Pacífico	Caribe
<b>Fragmento</b>	52%	52%	52%
<b>Filamento</b>	20%	26%	19%
<b>Esferas</b>	11%	6%	12%
<b>Espuma</b>	10%	10%	9%
<b>Gránulos</b>	4%	4%	4%
<b>Películas</b>	3%	2%	4%

Fuente. Elaboración propia a partir de Plastic litter pollution along sandy beaches in the Caribbean and Pacific coast of Colombia (Garcés-Ordóñez et al., 2020).

Del total de MP encontrados se analizan 1000 ítems y se realiza la clasificación según el tipo de polímero, los resultados de muestran en la tabla 12.

Tabla 12: Caracterización de los MP hallados en 43 playas de estudio según el tipo de polímero

<b>Formas de MP</b>	<b>PE</b>	<b>PS</b>	<b>PP</b>	<b>PVC</b>	<b>PU</b>	<b>HIPS</b>	<b>PET</b>
<b>Fragmentos</b>	69,7%	0,5%	28,4%	1%	-	-	-
<b>Fibras</b>	71,4%	-	14,3%	-	14,3%	-	-
<b>Pellet</b>	72,9%	-	27,1%	-	-	-	-
<b>Espuma</b>	-	97,6%	0,3%	-	0,7%	1,4%	-
<b>Gránulos</b>	100%	-	-	-	-	-	-
<b>Películas</b>	50%	-	-	-	-	-	50%
<b>Total de MP</b>	50%	28%	20%	0,6%	0,5%	0,4%	0,3%

Fuente. Elaboración propia a partir de Plastic litter pollution along sandy beaches in the Caribbean and Pacific coast of Colombia (Garcés-Ordóñez et al., 2020).

Como se observa en la tabla anterior, del total de los MP, el 50% corresponde a PE, a partir de esta información se genera la propuesta para el tratamiento de MP inicialmente para este tipo de polímero.

La investigación 2 se desarrolla en las costas del Caribe en playas de arena de Riohacha, Puerto Colombia, Cartagena y Coveñas. El resultado de esta investigación se expresa en masa promedio de los MP en mg y tamaño promedio en mm. El estudio de los MP arrojó un promedio de  $25,35 \pm 0,55$  mg y  $4,05 \pm 0,04$  mm (Acosta-Coley et al., 2019). El resultado anteriormente mencionado más el resultado de la investigación 1 y la información sobre el área de las playas, son el punto de partida para los cálculos que permitirán obtener la cantidad potencial estimada de MP disponible en las playas de arena del país.

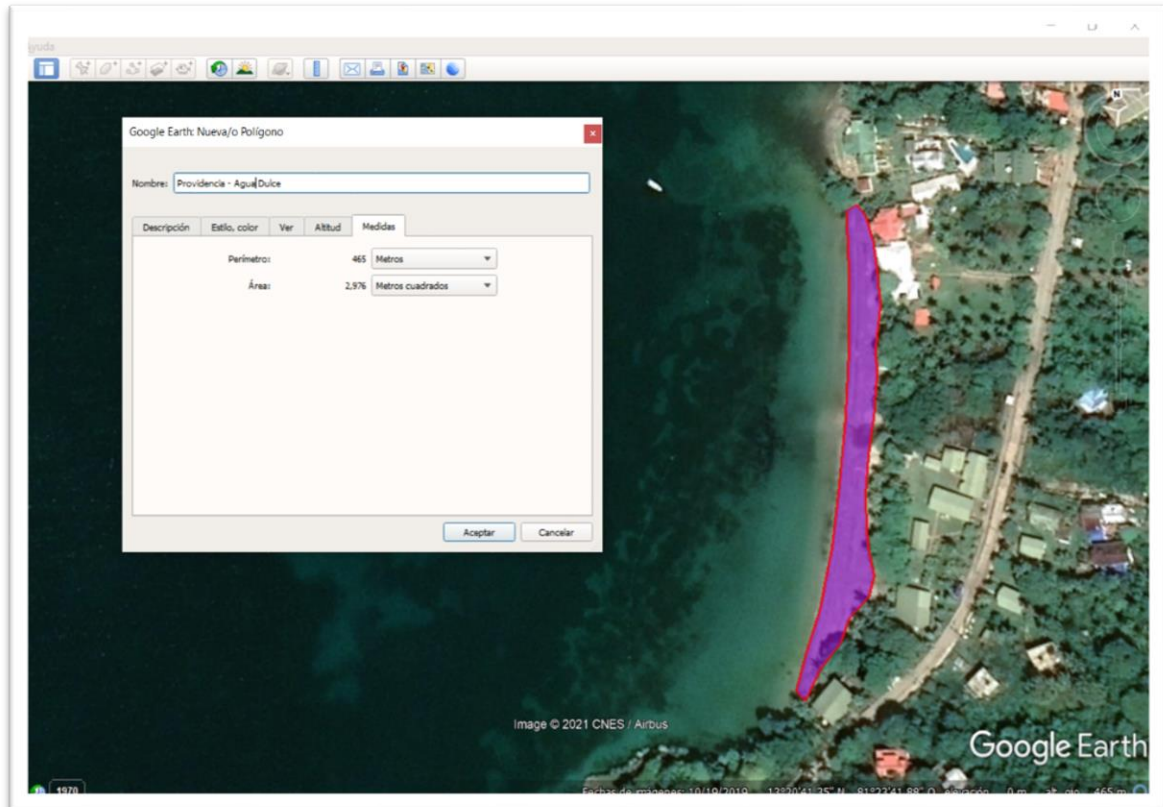
### 3.3 Tratamiento de datos

Para calcular la cantidad estimada de MP es importante tener en cuenta que el área de las playas de arena es un estimado, puesto que a la fecha no hay un estudio específico sobre el tema y no existen datos oficiales del mismo. En relación a la extensión neta de playas arenosas de Colombia esta cifra se desconoce, pero a partir de diversos estudios se ha logrado identificar una extensión de 789 Km de playa en el Caribe (Ceballos, 2003), para el Pacífico no se encuentran datos concluyentes.

Para este estudio se define el área de 126 de las 297 playas de arena reconocidas por el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible e INVEMAR (Gómez-Cubillos et al., 2015), esta cifra se obtiene de datos conocidos sobre el área de 7 playas del archipiélago de San Bernardo (INCODER & Universidad Jorge Tadeo Lozano, 2014) y con referencias de 119 playas más (DIMAR, 2021; Garcés-Ordóñez et al., 2020), se lleva a cabo la medición de sus respectivas áreas utilizando geoposicionamiento global y el software Google Earth® (Google, 2021). De las 126 playas, 82.54% corresponden a la zona Caribe y 17,46% al Pacífico.

Para realizar el proceso de medición de las áreas de playa con geoposicionamiento global, el primer paso es identificar la localización de la playa y hacer la búsqueda en el software, en casos donde la ubicación no está disponible se efectúa su localización de forma visual a partir de mapas como el de zonificación de playas de DIMAR o Google Mapas (Google, 2021), una vez ubicada la playa en Google Earth, con la ayuda de la herramienta regla en la posición polígono, se dibuja el área, se selecciona la unidad de medida que para este caso es en m<sup>2</sup> y el software calcula el área de la forma geométrica dibujada. En la siguiente figura se muestra un ejemplo de la medición.

Figura 4: Medición de área con geoposicionamiento global en Google Earth®



Fuente. Google Earth (Google, 2021)

La zona del litoral con potencial contenido de MP y que se tiene en cuenta para hacer la medición del área, va desde la línea límite del agua hasta la zona alta de la playa que es el límite máximo donde llega el agua en época de marea alta, en algunas playas, se encuentran construcciones muy cercanas a la línea del agua como se puede observar en la figura 5, en estos casos las edificaciones indican la frontera máxima del área a medir. El detalle de las mediciones del área de las 119 playas antes mencionadas se puede observar en el Anexo 2.

Figura 5: Construcciones en la playa en Coveñas



Fuente. Google Earth (Google, 2021)

Los resultados esta medición junto los datos anteriormente mencionados en relación a la cantidad de MP y su masa, son el punto base para calcular la cantidad estimada de MP y se muestran en la tabla 13.

Tabla 13: Datos base para calcular la cantidad estimada de MP disponible en 126 playas de arena de Colombia

<b>Datos promedio</b>	<b>Caribe</b>	<b>Pacífico</b>	<b>Origen de datos</b>
<b>Cantidad (Ítems MP/m<sup>2</sup>)</b>	318±314	138±125	Investigación 1
<b>Masa (mg)</b>	25,35±0,55	25,35±0,55	Investigación 2
<b>Área de playa (m<sup>2</sup>)</b>	4.972.590	2.501.305	Google Earth. Incoder
<b>Cantidad PE estimado</b>	50%	50%	Investigación 1

Fuente. Elaboración propia a partir de diversas fuentes (Acosta-Coley et al., 2019; Garcés-Ordóñez et al., 2020; Google, 2021; INCODER & Universidad Jorge Tadeo Lozano, 2014)

Con los datos de la tabla anterior se efectúan los cálculos para determinar la cantidad potencial de MP estimada en las 126 playas de arena que son objeto de estudio, se definen 3 escenarios:

- Escenario 1: tomando datos promedio de cantidad y masa de MP. Los resultados se muestran en la tabla 14.
- Escenario 2: tomando el límite superior del error estándar para la cantidad y masa de MP. Los resultados se muestran en la tabla 15
- Escenario 3: tomando el límite inferior del error estándar para la cantidad y masa de MP. Los resultados se muestran en la tabla 16.

Tabla 14: Cantidad potencial de MP estimado para escenario 1

Datos promedio	Caribe	Pacífico
<b>Cantidad (Ítems MP/m<sup>2</sup>)</b>	318	138
<b>Masa (mg)</b>	25,35	25,35
<b>Masa m<sup>2</sup> (g/m<sup>2</sup>) = Cantidad × Masa</b>	8,06	3,50
<b>Área de playa (m<sup>2</sup>)</b>	4.972.590	2.501.305
<b>Masa total MP (g) = Masa x m<sup>2</sup> × Área de playa</b>	40.085.540	8.750.315
<b>Masa total MP (Ton)</b>	40,09	8,75
<b>Masa PE (Ton)</b>	<b>20,04</b>	<b>4,38</b>

Fuente. Elaboración propia

Tabla 15: Cantidad potencial de MP estimado para escenario 2

Datos error estándar límite superior	Caribe	Pacífico
<b>Cantidad (Ítems MP/m<sup>2</sup>)</b>	632	263
<b>Masa (mg)</b>	25,9	25,9
<b>Masa m<sup>2</sup> (g/m<sup>2</sup>) = Cantidad × Masa</b>	16,37	6,81
<b>Área de playa (m<sup>2</sup>)</b>	4.972.590	2.501.305
<b>Masa total MP (g) = Masa x m<sup>2</sup> × Área de playa</b>	81.395.331	17.038.139
<b>Masa total MP (Ton)</b>	81,40	17,04
<b>Masa PE (Ton)</b>	<b>40,70</b>	<b>8,52</b>

Fuente. Elaboración propia

Tabla 16: Cantidad potencial de MP estimado para escenario 3

Datos error estándar límite inferior	Caribe	Pacífico
<b>Cantidad (Ítems MP/m<sup>2</sup>)</b>	4	13
<b>Masa (mg)</b>	24,8	24,8
<b>Masa m<sup>2</sup> (g/m<sup>2</sup>) = Cantidad × Masa</b>	0,10	0,32
<b>Área de playa (m<sup>2</sup>)</b>	4.972.590	2.501.305
<b>Masa total MP (g) = Masa x m<sup>2</sup> × Área de playa</b>	493.281	806.421
<b>Masa total MP (Ton)</b>	0,49	0,81
<b>Masa PE (Ton)</b>	<b>0,25</b>	<b>0,40</b>

Fuente. Elaboración propia

Como se observa en los resultados anteriores, en el escenario 1 con los datos promedio para cantidad y masa de MP se tendría una cantidad estimada de aproximadamente 25 toneladas de PE, en el escenario 2 con los límites superiores del error estándar aproximadamente 50 toneladas y en el escenario 3 con el límite inferior del error estándar aproximadamente 0.65 toneladas.

### 3.4 Conclusión preliminar

Colombia no es ajena a la dificultad que se está presentando a nivel global con relación a la proliferación de microplásticos en sus regiones costeras, y a la fecha existen pocas investigaciones en torno a este tema. Los primeros estudios que se han desarrollado en el campo dan cuenta de la presencia de estos elementos en todas las playas de arena estudiadas en el país, sin hallar diferencia entre zonas marítimas protegidas y no protegidas.

Sin embargo, como se requiere para el presente proyecto, se presentan dificultades para calcular la cantidad estimada de MP presente en las playas del Caribe y Pacífico Colombiano, esto debido a que no existen datos del área de las playas, sólo se encontró área

de 7 playas en el Archipiélago de San Bernardo, lo que hizo necesario efectuar la medición estimada para las demás playas a través de geoposicionamiento global.

Una vez obtenida esta información se calcula la cantidad potencial estimada de MP disponible en 126 playas de arena del país, cifra que asciende a 48,84 Toneladas, cantidad que permite hacer viable el diseño del proceso para su transformación y aprovechamiento.

## 4 RESULTADOS

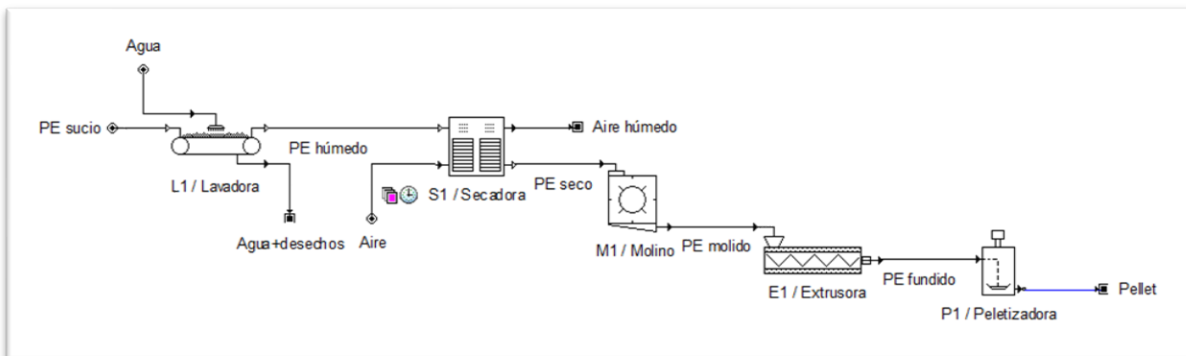
### 4.1 Diseño básico para el proceso de aprovechamiento de microplásticos de playas

Para el diseño básico del proceso se propone un proceso estándar de transformación del MP a partir del cual se plantea su viabilidad técnica y financiera.

#### 4.1.1 Viabilidad técnica

Con la información obtenida en el capítulo anterior se desarrolla el diseño del proceso con los datos calculados en el escenario 1 a partir de los promedios de cantidad y masa de MP, por lo tanto, el proceso se diseña inicialmente para una cantidad estimada disponible de 25 toneladas de PE, el diseño se observa en la siguiente figura.

Figura 6: Propuesta de diseño conceptual del proceso de aprovechamiento y transformación de microplásticos

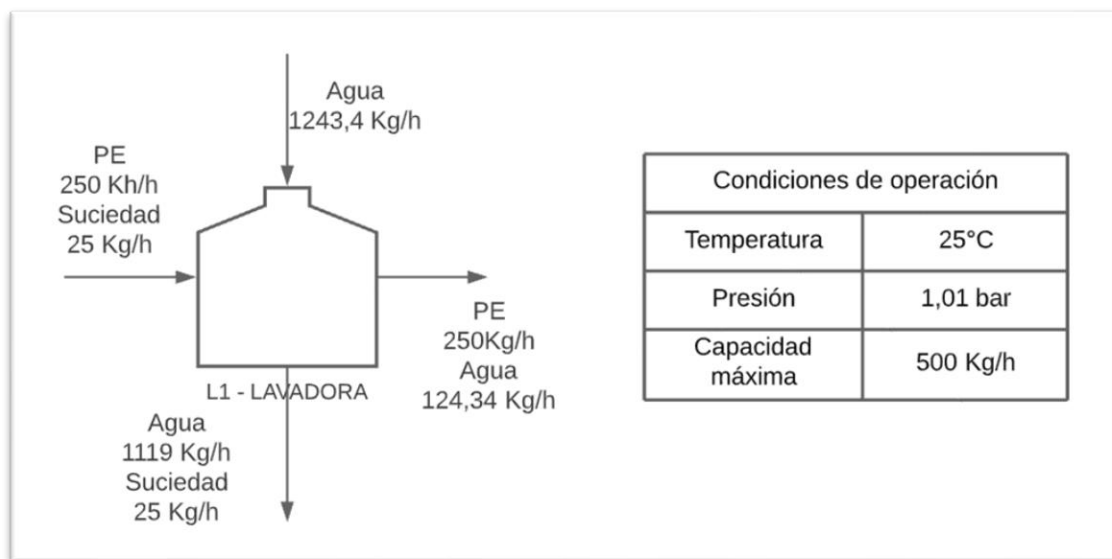


Fuente. Elaboración propia (*SuperPro Design*, 2000)

De acuerdo con la capacidad y diseño del proceso se requieren 6 unidades de secado, mientras que para los demás procesos unitarios es suficiente un equipo.

El proceso trabaja en batch de 1 hora en cada operación unitaria, ingresando al proceso una corriente de 250 Kg de PE el cual se calcula que contiene un 10% de masa adicional de impurezas (suciedad), para el lavado la relación MP-agua es de 1:5 (Chapa, 2005), por lo tanto la corriente entrante de agua a la lavadora equivale a 1243,4 Kg, allí se elimina toda la suciedad, el agua residual sale del proceso y el PE limpio y húmedo se envía a la siguiente unidad de proceso. El diagrama de equipo de esta operación se presenta en la siguiente figura.

Figura 7: Gráfica operación unitaria de lavado



Fuente. Elaboración propia (*SuperPro Design*, 2000)

El modelo de operación de lavado resuelve los siguientes balances de masa para cada componente puro contenido en las corrientes de alimentación y lavado (*SuperPro Design*, 2000):

$$m_{P,i} = (1 - x_i)m_{F,i} + rm_{w-in,i} \quad (1)$$

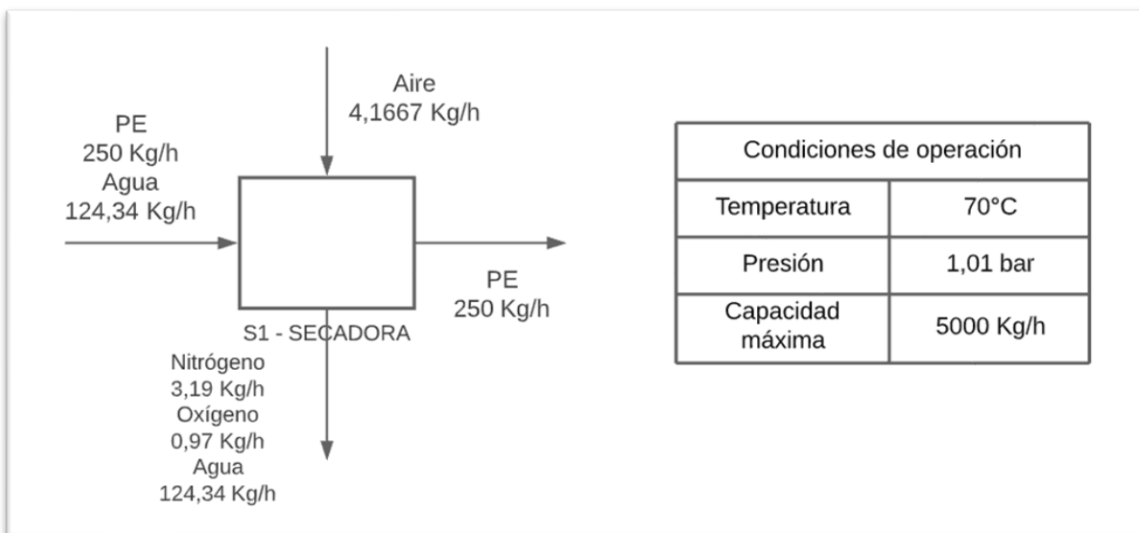
$$m_{w-out,i} = (1 - r)m_{w-in,i} + x_im_{F,i} \quad (2)$$

Donde:

- $m_{F,i}$  es el caudal másico del componente puro  $i$  en la corriente de alimentación (kg/s)
- $m_{P,i}$  es el caudal másico del componente puro  $i$  en la corriente de producto (kg/s)
- $x_i$  es la fracción de flujo del componente puro  $i$  en la corriente de alimentación que es eliminada por la corriente de lavado
- $m_{w-in,i}$  es el caudal másico del componente puro  $i$  en la corriente de lavado (kg/s)
- $m_{w-out,i}$  es el caudal másico del componente puro  $i$  en la corriente de lavado (kg/s)
- $r$  es la fracción del flujo de la corriente de lavado que es retenida por la corriente de producto

En la siguiente unidad de proceso el PE húmedo ingresa a la unidad de secado en donde se elimina la humedad que contiene el PE con una corriente de aire a 70 °C. El aire húmedo sale del proceso y los 250 Kg de PE ya seco pasan a la siguiente operación. El diagrama del equipo de secado se observa en la siguiente figura.

Figura 8: Gráfica operación unitaria de secado



Fuente. Elaboración propia (*SuperPro Design*, 2000)

La siguiente ecuación se utiliza para dimensionar el equipo de secado (Pakowski & Mujumdar, 2007):

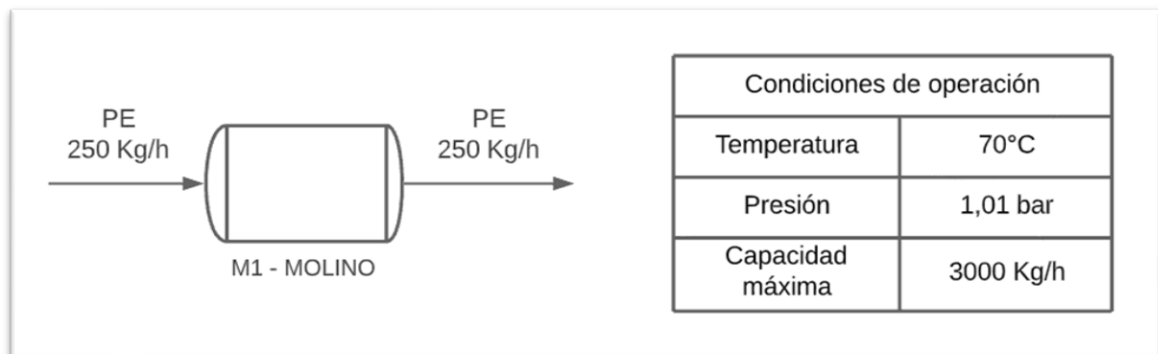
$$W_1 X_1 - W_2 X_2 - wDA = mS \frac{dy}{dT} \quad (3)$$

Donde:

- W es el flujo de sólido en masa x tiempo
- $X_1$  es la fracción del componente 1
- $X_2$  es la fracción del componente 2
- $mS \frac{dy}{dT}$  es la masa del sólido

Una vez el PE seco entra al molino se lleva a cabo la trituration del material de tal forma que el tamaño del MP quede homogénea, en la operación unitaria entran y salen 250 Kg de PE. Esta parte del proceso se observa en la siguiente figura.

Figura 9: Gráfica operación unitaria de trituration



Fuente. Elaboración propia (*SuperPro Design*, 2000)

El modelo de operación de molino resuelve el siguiente balance de masa para cada componente contenido en las corrientes (Novoselov et al., 2017):

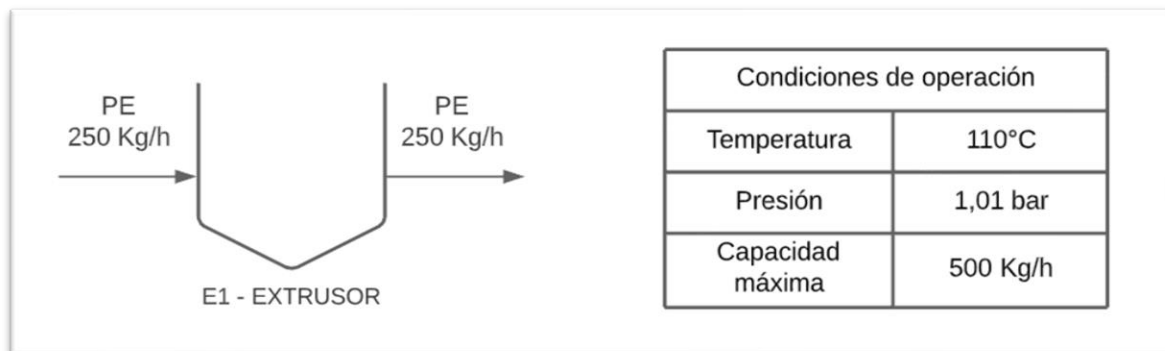
$$t(z) = t \frac{z^2(D+d)}{Dd} = t - \frac{z^2}{D_e} \quad (4)$$

Donde:

- $z$  es la distancia de la sección desde el plano principal
- $D$  y  $d$  es un diámetro de la rueda y la pieza de trabajo, respectivamente
- $L = (tD_e)^{0.5}$  es la distancia desde el plano principal hasta el punto de sección de las superficies convencionales de la rueda y la pieza de trabajo
- $D_e$  es el diámetro equivalente

El PE con tamaño homogéneo entra posteriormente la operación unitaria del extrusor, este equipo eleva la temperatura del material a  $110^\circ\text{C}$  que es la temperatura de fusión del PE. Esta parte del proceso se observa en la siguiente figura.

Figura 10: Gráfica operación unitaria de extrusión



Fuente. Elaboración propia

La siguiente ecuación se utiliza para dimensionar el equipo de extrusión (*SuperPro Design*, 2000):

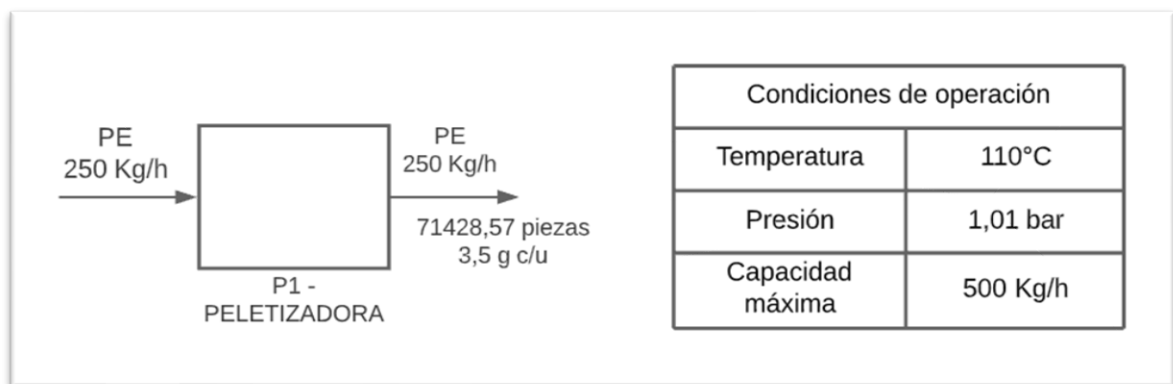
$$R = aD^2hgN \quad (5)$$

Dónde:

- R es el rendimiento másico (kg/h)
- D es el diámetro del tornillo (cm)
- h es la profundidad de la sección de medición (cm)
- g es la gravedad específica de la resina (PE)
- N es la velocidad de rotación del tornillo (rpm)
- a es una constante cuyo valor depende de las unidades de las otras variables.

El PE fundido entra finalmente a la peletizadora en donde adquiere forma de tabletas de 1 in x 1 in y una masa de 3.5 g, la corriente final del proceso estará compuesta por 71.428 piezas de PE. Esta parte del proceso se presenta en la siguiente figura.

Figura 11: Gráfica operación unitaria de peletizado



Fuente. Elaboración propia (*SuperPro Design*, 2000)

A continuación se presentan las ecuaciones de la operación de peletizado (Abubakre et al., 2014), para la presión:

$$P = \frac{l}{z} \quad (6)$$

Donde:

- P es la presión de operación
- I es la potencia del equipo
- Z es el volumen operación (capacidad)

Para la fuerza de empuje:

$$W = PA \quad (7)$$

Donde:

- P es la presión en el contenedor
- A es el área del extrusor =  $\pi \frac{(D^2 - d^2)}{4}$
- W es la fuerza de empuje

Para determinar el material (H) en el barril de extrusión, esto puede calcularse usando la relación Van Zuilichien:

$$H = \Delta V_{Tot} \quad (8)$$

Dónde:

- H es el material por m<sup>3</sup>
- D es el grado de llenado obtenido
- V es el volumen de reacción de la extrusora = volumen de barril - volumen de tornillo

Aún cuando el proceso planteado trabaja con una corriente de 250 Kg de PE, la capacidad máxima del proceso teniendo en cuenta las capacidades máximas individuales de cada equipo, es de 500 Kg/h.

#### 4.1.2 Viabilidad financiera

Partiendo de la disponibilidad de 25.000 Kg de PE en forma de MP para su transformación, se calcula el costo unitario del producto en \$654 a partir de los costos

variables unitarios de producción, éste y otros datos sobre los cuales se analiza la viabilidad financiera se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 17: Información inicial para el análisis financiero

<b>Rubro</b>	<b>Valor</b>
<b>Cantidad</b>	25.000
<b>Costo unitario del producto</b>	\$ 654
<b>Crecimiento porcentual anual en ventas</b>	5%
<b>Año base</b>	2021
<b>Tasa Impto Renta</b>	32%
<b>Tasa para el cálculo de VPN</b>	25%
<b>Inversión inicial</b>	\$ 600'000.000
<b>Patrimonio de la empresa</b>	\$ 100'000.000
<b>Gastos fijos para el primer año</b>	\$ 12'665.591
<b>Nóminas primer año</b>	\$ 50'000.000
<b>Presupuesto para marketing durante el primer año</b>	\$ 5'000.000
<b>Aporte a realizar por los empresarios</b>	\$ 50'000.000

Fuente. Elaboración propia

Dentro de la inversión inicial se tiene en cuenta la adquisición de los equipos, adecuación del edificio, todos los temas relacionados a la puesta en marcha de la planta, equipo de oficina, muebles y enseres. En lo referente al patrimonio de la empresa, se ve representado en el lote para la instalación de la planta. Los gastos fijos para el primer año incluyen el pago de facturas de servicios públicos, servicio de internet, página web, aseo, entre otros.

Se propone un aporte de \$ 50'000.000 entre los empresarios, por lo que se plantea la solicitud de un crédito para la puesta en marcha de la planta por \$ 450'000.000 a una tasa

de interés anual del 12%, el riesgo será asumido por la sociedad generada entre los empresarios.

El análisis financiero se desarrolla a partir de 3 escenarios en función del precio de venta por Kg de PE, para lo cual se toman precios de diversos proveedores que se muestran en la siguiente tabla. Para el escenario 1 se toma el precio de venta mínimo en \$1.800, para el escenario 2 el precio de venta se fija en un valor similar al promedio de los precios encontrados, \$9.000 y para el escenario 3 se plantea el precio justo de venta con el cual se obtiene buen margen de utilidad y es de \$15.000.

Tabla 18: Precios de venta de PE por Kg en forma de pellet

<b>Proveedor</b>	<b>Precio mínimo</b>	<b>Precio máximo</b>
Shijiazhuang Youmo Trading Co.	\$3.641	\$36.409
Gguangzhou Sourcing Supply Chain co.	\$3.641	\$20.390
Dawn Group Co.	\$9.102	\$18.205
Xiamen LFT Composite Plastic Co	\$7.246	\$9.685
Spinel Co.	\$1.857	\$1.857
Dezhou Ruicai Plastic Technology Co.	\$4.734	\$5.279
Dongguan Zhihe Masterbatch Technology Co	\$1.820	\$1.820
Yangzhou Baiya Import And Export Trading Co.	\$5.826	\$36.410

Fuente. Elaboración propia con información extraída del portal de internacional de ventas Alibaba (Alibaba, 2021)

#### **4.1.2.1 Análisis escenario 1, precio de venta mínimo**

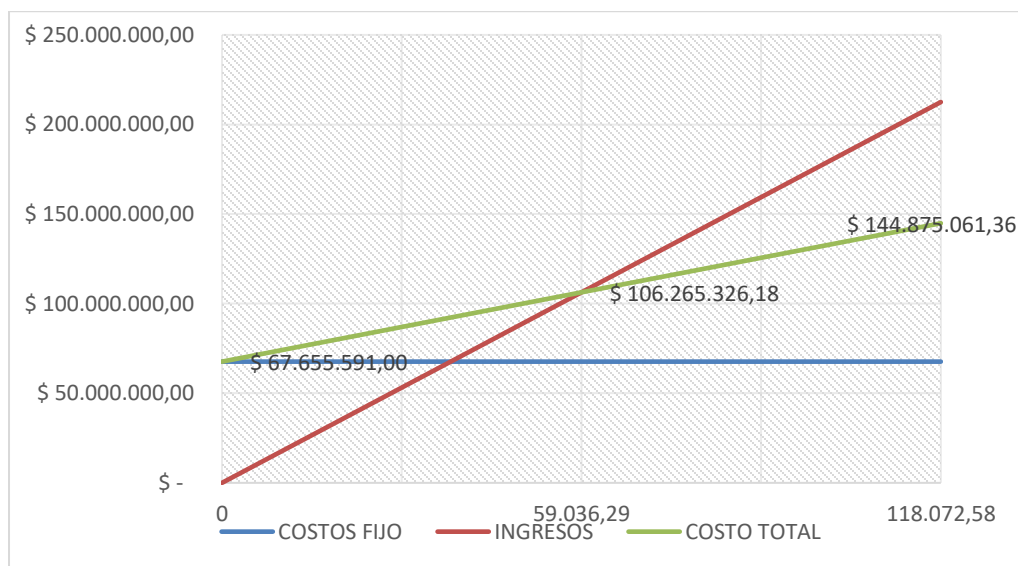
Con el precio mínimo de venta, la evaluación financiera y los estados financieros básicos proyectados arrojan un valor negativo para la utilidad neta en los primeros 5 años, así:

- Año 1: - \$109'685.591
- Año 2: - \$164'272.050
- Año 3: - \$145'570.213
- Año 4: - \$124'532.868
- Año 5: - \$108'483.923

De la misma forma el Valor Presente Neto es negativo y corresponde a - \$667'265.609, por lo cual se deduce que la planta estaría operando con pérdida neta. El punto de equilibrio como se observa en la siguiente figura, se lograría con la venta de 59.037 unidades, cifra que se alcanzaría según la proyección hasta el año 19 posterior a la puesta en marcha. Con esta información fácilmente se deduce que el proyecto en estas condiciones no es viable.

El detalle de la evaluación financiera y los estados financieros básicos proyectados para este escenario se muestran en los anexos 3 y 4 respectivamente.

Figura 12: Punto de equilibrio escenario 1, precio mínimo de venta



Fuente. Elaboración propia en simulador financiero (Reyes Giraldo, 2013)

#### ***4.1.2.2 Análisis escenario 2, precio promedio de venta***

Con el precio promedio de venta, la evaluación financiera y los estados financieros básicos ya muestran que se logra generar utilidad neta para los primeros 5 años de funcionamiento de la planta, así:

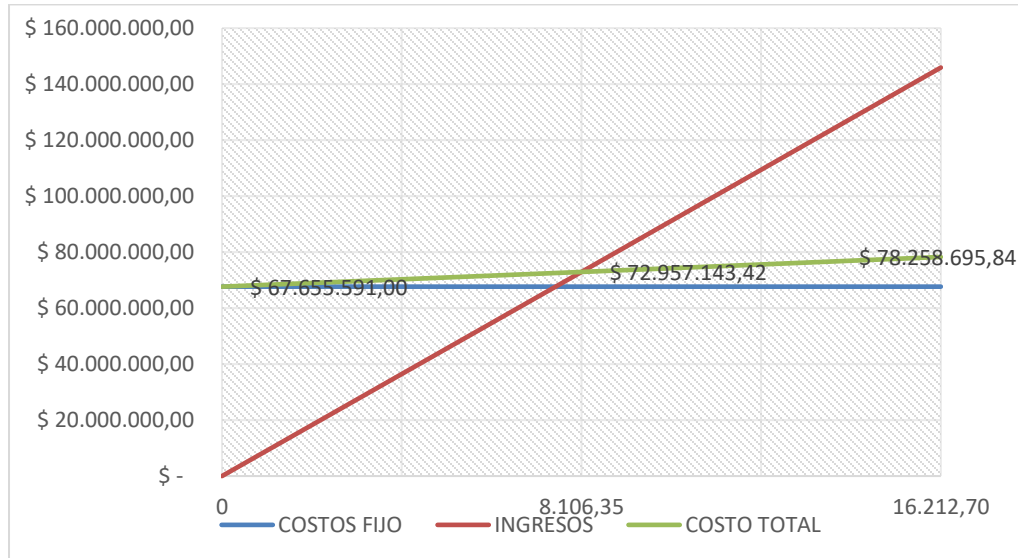
- Año 1: \$47'813.798
- Año 2: \$20'606.346
- Año 3: \$43'856.901
- Año 4: \$69'354.174
- Año 5: \$92'336.218

Sin embargo, el Valor Presente Neto es negativo, -\$248'699.129, al igual que la Tasa Interna de Retorno que corresponde a -38,09%, lo cual indica que en estas condiciones el proyecto aún no es factible.

En este caso el punto de equilibrio como se observa en la siguiente figura, se lograría con la venta de 8.107 unidades, cifra que se alcanzaría según la proyección en el primer año de funcionamiento de la planta, de igual forma es posible identificar en la gráfica que los costos totales aumentan a una tasa mucho menor que en el escenario anterior.

El detalle de la evaluación financiera y los estados financieros básicos proyectados para este escenario se muestran en los anexos 5 y 6 respectivamente.

Figura 13: Punto de equilibrio escenario 2, precio promedio de venta



Fuente. Elaboración propia en simulador financiero (Reyes Giraldo, 2013)

#### 4.1.2.3 Análisis escenario 3, precio promedio de venta justo

Con el precio de venta justo que corresponde a \$ 15.000, la evaluación financiera y los estados financieros básicos proyectados, muestran que se logra generar un buen margen de utilidad neta de acuerdo con la proyección para los primeros 5 años de funcionamiento de la planta, así:

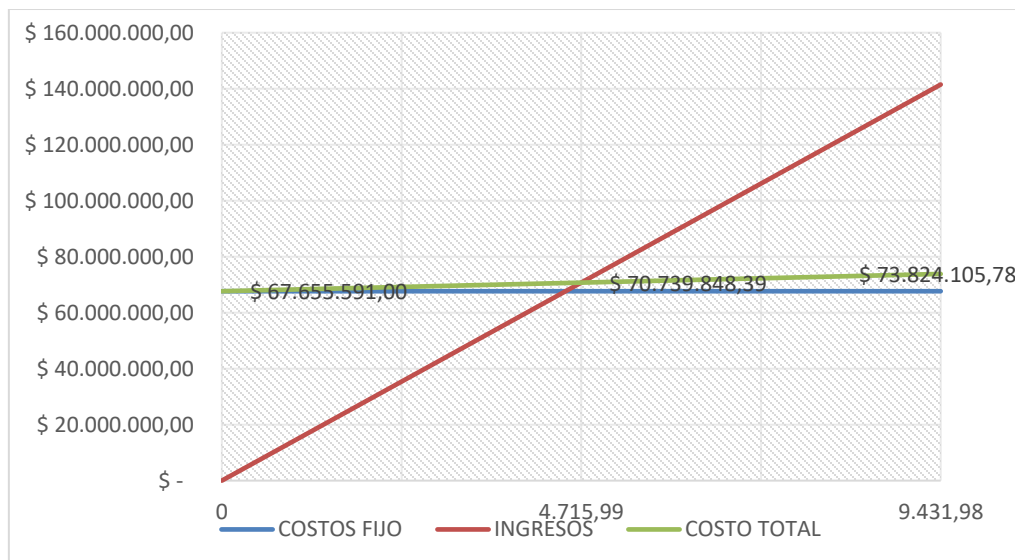
- Año 1: \$149'813.798
- Año 2: \$130'865.796
- Año 3: \$162'894.106
- Año 4: \$197'717.943
- Año 5: \$230'757.289

En este escenario ya se obtiene un Valor Presente Neto positivo de \$78'936.638, entregando rentabilidad con una Tasa Interna de Retorno de 36,91%. En este caso el punto

de equilibrio como se observa en la siguiente figura, se lograría con la venta de 4.716 unidades, cifra que se alcanzaría según la proyección en el primer año de funcionamiento de la planta, de igual forma es evidente en la gráfica que los costos totales son más bajos cada año en relación a los escenarios anteriores.

El detalle de la evaluación financiera y los estados financieros básicos proyectados para este escenario se muestran en los anexos 7 y 8 respectivamente.

Figura 14: Punto de equilibrio escenario 3, precio justo de venta



Fuente. Elaboración propia en simulador financiero (Reyes Giraldo, 2013)

El precio de venta de \$15.000 aun cuando se encuentra por encima del promedio está dentro de los límites de precio del mercado y se considera un precio justo teniendo en cuenta la dificultad para llevar a cabo la recuperación del MP y que el proceso asociado al aprovechamiento del producto contribuye a la remoción de material contaminante del medio ambiente, por otro lado, actualmente los clientes están dispuestos a pagar un precio un poco más alto por un producto si su origen es el reciclaje. Adicionalmente se esperan beneficios

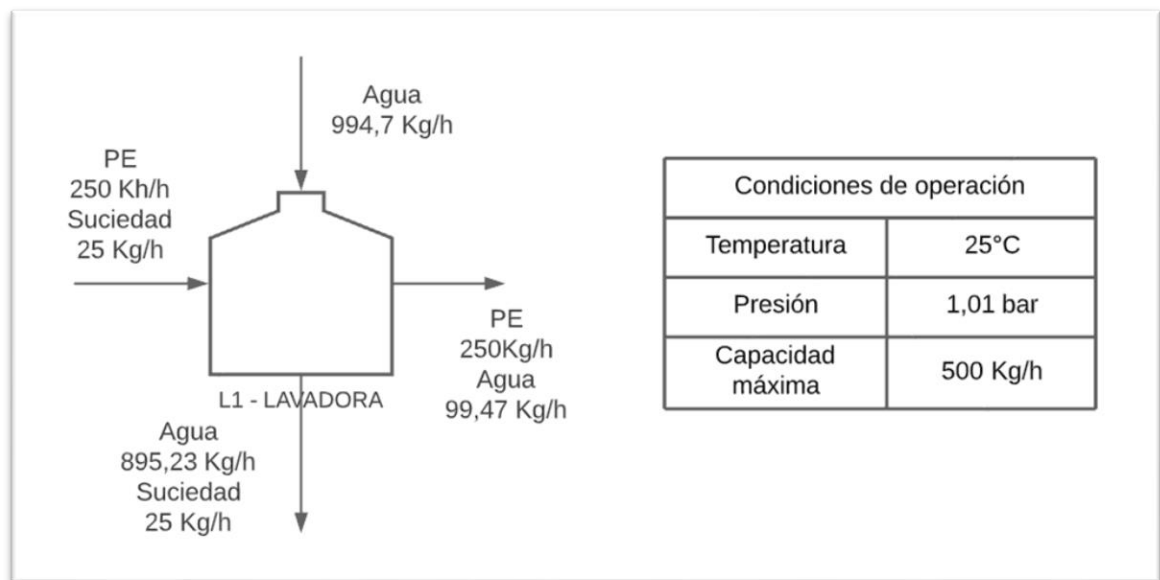
tributarios en cuanto a la deducción de impuestos que ofrece el gobierno asociados a la conservación y mejoramiento del medio ambiente (ANLA, 2017).

#### 4.2 Propuesta de proceso verde

Teniendo como base fundamental los 12 principios de la química verde se propone modificar el proceso a partir del escenario 3, reduciendo la cantidad de agua empleada para el lavado del material de tal forma que sea en proporción 1:4 (anteriormente 1:5), entre el material a lavar y el agua.

Con esta modificación el diagrama de proceso continuará siendo el mismo, pero los diagramas de las operaciones unitarias de lavado y secado y sus respectivos balances de masa cambian. En la siguiente figura de muestran los nuevos datos asociados a las corrientes de entrada y salida de la primera unidad de proceso.

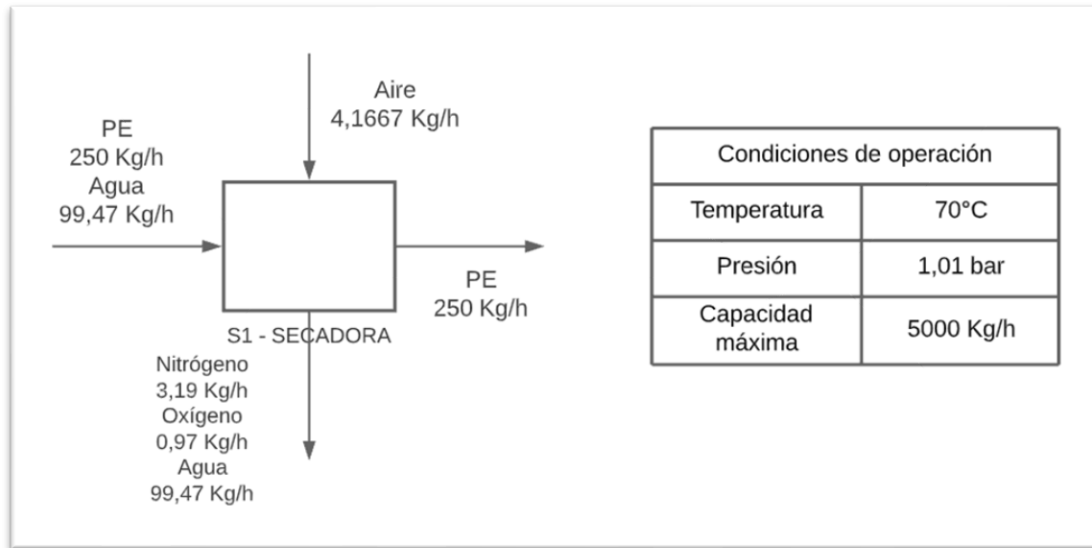
Figura 15: Gráfica operación unitaria de lavado para el proceso verde



Fuente. Elaboración propia (*SuperPro Design*, 2000)

Como resultado de la operación anterior, a la secadora entrará una cantidad menor de agua con relación al proceso propuesto inicialmente, como se observa en la siguiente figura.

Figura 16: Gráfica operación unitaria de secado para el proceso verde



Fuente. Elaboración propia (*SuperPro Design*, 2000)

Como resultado de la modificación planteada, los costos asociados al proceso, entre otros datos también cambian, como se puede ver en la siguiente tabla comparativa.

Tabla 19: Comparativo entre el proceso inicial y el proceso verde

	<b>Propuesta de proceso inicial</b>	<b>Propuesta de proceso verde</b>
<b>Consumo total de agua (m<sup>3</sup>)</b>	124	99
<b>Costo de consumo de agua</b>	\$461.091	\$368.864
<b>Costo unitario de producción (por Kg)</b>	\$654	\$645
<b>Tasa Interna de Retorno</b>	36,91%	36,98%

Fuente. Elaboración propia

El ajuste en la cantidad de agua para lavado se ve reflejado una reducción del consumo en 25 m<sup>3</sup>, adicionalmente se reduce el consumo de otros consumibles asociados al proceso que permiten una disminución en el costo unitario de producción de \$9, esto conlleva a un leve incremento en el Valor Presente Neto de \$496.656 y en la Tasa Interna de Retorno de 0,07%. La evaluación financiera y los estados financieros básicos proyectados para este escenario se muestran en detalle en los anexos 9 y 10 respectivamente.

### 4.3 Plan de Intervención

La información a ser estimada es fundamentada en el diseño de proceso de aprovechamiento de residuos propuesto, y en consecuencia, el cálculo de MP en las playas de costas colombianas, dimensionamiento de la planta en relación al cálculo de MP. En este sentido, una vez establecido el potencial de arena a ser tratada, datos de la literatura abierta en relación a la presencia de MP son utilizados como fundamento, identificando así: datos de experimentos de la cantidad de MP/m<sup>2</sup> y la identificación de los tipos de polímero presentes en la arena de playas de las costas del Caribe y Pacífico Colombiano.

El conocimiento de área de las playas de arena colombianas fue desarrollado seguidamente, sin embargo, al no existir datos oficiales unificados, la información fue compilada a partir de 2 fuentes: datos conocidos del área de 7 playas del archipiélago de San Bernardo (INCODER & Universidad Jorge Tadeo Lozano, 2014), y por geoposicionamiento global computacional; con estas consideraciones, fueron medidas las áreas de 119 playas más, 97 de ellas en el mar Caribe y 11 más en el Pacífico, dando como resultado un área para las 126 playas de 7'474.000 m<sup>2</sup>, con una cantidad promedio estimada de 98,43 Toneladas de MP; de acuerdo a los cálculos establecidos, aproximadamente 50 Toneladas corresponde a PE siendo el polímero presente en mayor proporción.

Tomando la cantidad en masa de MP, correspondiente a 50 Toneladas, es diseñado y simulado el proceso de aprovechamiento utilizando el software SuperPro Designer® en el

cual se obtiene como producto final *pellet* de 1 in<sup>2</sup>, el proceso cuenta con 5 unidades de proceso: Lavadora, Secadora, Molino, Extrusora y Peletizadora, cuyos detalles de corrientes y condiciones de operación se pueden ver en las figuras 7 a 11.

De las condiciones de proceso y las variables que intervienen se efectúa la evaluación financiera para determinar la viabilidad técnico-económica a partir de 3 escenarios en torno al precio de venta por Kg de producto: \$1.800, \$9.000 y \$15.000 (Datos comerciales a marzo 2021 en oriente). En los 2 primeros escenarios la evaluación financiera arrojó resultados con lo que se concluye que el proyecto no es viable, para el escenario 3 se obtiene un Valor Presente Neto de \$78'936.638 y una Tasa Interna de Retorno de 36,91%, con un punto de equilibrio en la venta de 4.716 unidades, cifras que indican la viabilidad del proyecto a precio de venta de \$15.000.

Consecuentemente, son incluidos los conceptos de procesos verdes, inicialmente el enfoque se llevó a reducir el consumo de energía en la unidad de proceso de secado permitiendo cierta cantidad de humedad en el producto, sin embargo, la humedad reduce la calidad del producto al permitir que éste se degrade más fácilmente, por lo cual se desechó esta idea. La siguiente idea planteada y ejecutada en el diseño, fue reducir la cantidad de agua para el proceso de secado, obteniendo resultados satisfactorios en cuanto al consumo de agua. Los datos de las corrientes y condiciones de operación aplicando los conceptos verdes en el proceso se pueden ver en las figuras 15 y 16.

El ajuste efectuado para el proceso verde también generó un cambio positivo en la evaluación económica, se obtiene un Valor Presente Neto de \$79'433.294 y una Tasa Interna de Retorno de 36,98%, con un punto de equilibrio en la venta de 4.713 unidades, cifras levemente superiores a las obtenidas en la evaluación financiera del proceso antes de aplicar los conceptos verdes, indicando que el proyecto continúa siendo viable.

Una vez definidos los criterios bajo los cuales funcionará el proceso, se plantea el cronograma con las actividades previas requeridas para llegar a la puesta en marcha de la planta, que se observa en detalle en el anexo 11.

#### **4.4 Estudios Futuros**

Luego de la revisión de la literatura y la investigación con relación al tema de Microplásticos en Colombia, es evidente que hay mucho por hacer en este campo, parte de los estudios futuros incluyen un muestreo más riguroso en diferentes playas del país, especialmente en el Pacífico que es el sector del cual se encuentra menos información disponible y con menos estudios realizados. También se requiere una caracterización más profunda de los diferentes tipos de MP hallado en los muestreos y otro interesante estudio a futuro es abordar la investigación de la presencia de MP en las aguas y sedimentos en el mar, un tema aún menos investigado en Colombia en relación con las playas.

El estudio de la absorción de elementos no deseados en el MP como biológicos o metales es un tema que no se ha abordado en el país y que se requiere su investigación de tal forma que aporte para obtener una mejor caracterización del MP y así contribuya a lograr mejores procesos para su aprovechamiento con la obtención MP reciclado de mejor calidad.

Por último, la construcción del prototipo del proceso verde planteado para el aprovechamiento y transformación de MP, que sirva como prueba piloto y permita afinar el proceso, darlo a conocer y despertar el interés en la academia y en empresas privadas que de alguna forma puedan aportar para continuar la investigación y obtener resultados concretos en la reducción del MP en el medio ambiente y minimizar sus impactos.

#### **4.5 Conclusiones del capítulo**

Para determinar la viabilidad del proceso fue necesario hacer una breve investigación sobre el mercado del PE, encontrando amplia variedad en los precios de venta, permitiendo

simular el proceso y su viabilidad con diferentes precios, pero siempre dentro del rango. También fue posible identificar que el país con la mayor oferta de PE en forma de pellet es China muy por encima de los demás países de la lista. A nivel regional el mayor proveedor es Brasil.

El diseño del proceso y su respectiva simulación demostró que es viable el proceso para el aprovechamiento y transformación del MP a partir de la cantidad estimada de PE presente en 126 playas del país, esto nos permite inferir que será viable para la totalidad del MP presente en las 297 playas reconocidas por el Minambiente.

El planteamiento del proceso verde dio como resultado adicional al ahorro en el consumo de agua, un pequeño incremento en la utilidad y teniendo en cuenta que la cantidad de MP de las playas es finita, con pequeñas modificaciones la instalación podrá recibir plástico de otras fuentes y continuar su funcionamiento, lo cual hace aún más rentable el proceso.

Por otra parte, y para tener en cuenta en estudios futuros, es posible incluir en la planta otro proceso para el tratamiento y reutilización del agua logrando reducir el impacto en el medio ambiente e incrementado más las utilidades

## 5 CONCLUSIONES GENERALES

- La revisión de la literatura permitió conocer las características de los polímeros e identificar los métodos por medio de los cuales se pueden recuperar y aprovechar para su reutilización, como lo son: el reciclaje mecánico, químico y térmico, la degradación bacteriana o por efectos de luz y los procesos catalíticos. En esta misma revisión fue posible identificar la presencia de microplásticos en todas las regiones del mundo, incluidos mares marginales, aguas polares, suelos e incluso agua embotellada y alimentos como la miel, la sal y el azúcar. En cuanto a los datos en relación a la presencia de microplásticos en Colombia, investigaciones recientes dan cuenta de MP en las playas de arena del país, mostrando un promedio de  $318 \pm 314$  ítems de MP/m<sup>2</sup> para las playas estudiadas en el Caribe y  $138 \pm 125$  ítems MP/m<sup>2</sup> para las costas del pacífico.
- Con información sobre la caracterización, cuantificación y masa de los microplásticos presentes en las playas del país provenientes de investigaciones recientes, y con un trabajo cuidadoso para medir el área de 126 playas de arena del país, fue posible llevar a cabo un estudio técnico que permitió calcular un estimado de la cantidad potencial de microplásticos, dando como resultado un aproximado total de 50 toneladas, de las cuales el 50%, es decir, 25 toneladas, corresponden a Polietileno.
- Con el estudio técnico a partir de la información obtenida en la revisión de la literatura y los hallazgos en cuanto a caracterización y cuantificación del microplástico se identificó el aprovechamiento del microplástico a partir de transformaciones físicas y mecánicas como el método más viable, obteniendo como producto final pellet de 1 pulgada cuadrada. La simulación del proceso para el aprovechamiento de las 25 toneladas estimadas de PE se desarrolló en SuperPro Design, obteniendo un consumo de agua de 124 m<sup>3</sup>.

- Teniendo como base un costo unitario de producción por Kg de \$654, se evalúa financieramente el diseño inicial del proceso en 3 escenarios, el primero de ellos teniendo como precio de venta por kilo de pellet el precio mínimo encontrado en el mercado que es de \$1.800 aproximadamente, dando como resultado una utilidad neta negativa para los 5 primeros años y un punto de equilibrio que se alcanzaría en 19 años, lo cual lo hace inviable.
- La evaluación financiera en el escenario 2 se efectuó con un precio de venta promedio por Kg de PE, \$9.000, se logra generar utilidad neta en los primeros 5 años, sin embargo, la tasa interna de retorno es negativa.
- En el escenario 3 con un precio justo de venta de \$15.000 por Kg, teniendo en cuenta la dificultades para la recuperación del MP y siendo un proceso que contribuye a eliminar contaminantes del ambiente, se logra un buen margen de utilidad, el punto de equilibrio se logra en el primer año y una Tasa Interna de Retorno de 36,91%.
- Al proceso inicialmente planteado se le efectúan modificaciones teniendo como base los 12 principios de la química verde, éste se plantea ahorrando un 20% de agua en la unidad de proceso de lavado, con este ajuste el consumo se reduce a 99 m<sup>3</sup> y se evidencia también la reducción en consumibles del proceso.
- En la evaluación financiera del proceso verde se nota una reducción en el costo unitario de producción por Kg de \$9, generando un leve incremento en la Tasa Interna de Retorno de 0,07%.
- Para el planteamiento del proceso verde se llegó a simular el proceso modificando también la unidad de proceso de secado para evaporar sólo el 95% del agua, permitiendo un producto con 5% de humedad, esto viendo que algunos proveedores de pellet distribuyen producto con cierta cantidad de humedad, la cual informan en sus publicaciones. Este ajuste reducía el consumo de energía en un 11%, así como el costo

de producción por unidad en \$11 adicionales, sin embargo, la humedad en el PE reduce su calidad y facilita su deterioro, por lo cual la idea fue desechada.

- Una dificultad encontrada en el desarrollo del proyecto fue la falta de información oficial en lo concerniente a la extensión y área de las playas del país, en este aspecto la DIMAR está llevando a cabo la labor de caracterizar las primeras 75 playas, sin embargo, aún no incluye información sobre su área.
- Con algunas modificaciones al proceso, también se estaría en la capacidad de transformar plásticos de tamaños macro, lo cual hace aún más rentable el proceso y permite aportar más en la eliminación de desechos.
- Incluyendo operaciones unitarias al proceso planteado es posible incluir el tratamiento de aguas residuales, lo que reduce aún más el consumo de agua y reduce la emisión de desechos al medio ambiente, esto se incluiría en estudios futuros.

## 6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abubakre, O., Garba, A., & Tukur, H. (2014). Design and Fabrication of Model Feed Pelletizer. *Applied Mechanics and Materials*, 533, 64–67. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.533.64>
- Achilli, A., Cath, T. Y., Marchand, E. A., & Childress, A. E. (2009). The forward osmosis membrane bioreactor: A low fouling alternative to MBR processes. *Desalination*, 239(1–3), 10–21. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.02.022>
- Acoplásticos Colombia. (2020). *Plásticos en Colombia 2020-2021*. <https://acoplásticos.org/AFshjuraaF47lfjbOSTNKYs4831gepsfiq57DRCFws38164LXIEMF14hqnr/uWnfRy9q/pec21/2/#zoom=z>
- Acosta-Coley, I., Duran-Izquierdo, M., Rodriguez-Cavallo, E., Mercado-Camargo, J., Mendez-Cuadro, D., & Olivero-Verbel, J. (2019). Quantification of microplastics along the Caribbean Coastline of Colombia: Pollution profile and biological effects on *Caenorhabditis elegans*. *Marine Pollution Bulletin*, 146, 574–583. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.06.084>
- Akhtar, S., Randhawa, M. A., Riaz, M., Hameed, A., Ismail, T., Ismail, A., & Ali, Z. (2015). Food safety conundrum: A Pakistan's scenario. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 7(4), 559–567. <https://doi.org/10.3920/QAS2014.0435>
- Alibaba. (2021). *Alibaba.com: Manufacturers, Suppliers, Exporters & Importers from the world's largest online B2B marketplace*. <https://www.alibaba.com/>

- Al-Salem, S. M., Lettieri, P., & Baeyens, J. (2009). Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 29(10), 2625–2643. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.06.004>
- Al-Salem, S. M., Lettieri, P., & Baeyens, J. (2010). The valorization of plastic solid waste (PSW) by primary to quaternary routes: From re-use to energy and chemicals. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36(1), 103–129. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.09.001>
- Alvarado, J. G., Delgado Linares, J. G., & Medina, H. R. (2015). Rol de la Química Orgánica en los procesos de conversión de hidrocarburos. *Educación Química*, 26(4), 288–298. <https://doi.org/10.1016/j.eq.2015.08.001>
- Andrady, A. L., & Neal, M. A. (2009). Applications and societal benefits of plastics. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 364(1526), 1977–1984. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0304>
- ANLA. (2017). *Deducción de Renta por Inversiones en Control y Mejoramiento del Medio Ambiente*. <http://portal.anla.gov.co/deduccion-renta-inversiones-control-y-mejoramiento-del-medio-ambiente>
- Ariza-Tarazona, M. C., Villarreal-Chiu, J. F., Barbieri, V., Siligardi, C., & Cedillo-González, E. I. (2019). New strategy for microplastic degradation: Green photocatalysis using a protein-based porous N-TiO<sub>2</sub> semiconductor. *Ceramics International*, 45(7), 9618–9624. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.10.208>
- Auta, H. S., Emenike, C. U., & Fauziah, S. H. (2017). Screening of *Bacillus* strains isolated from mangrove ecosystems in Peninsular Malaysia for microplastic degradation.

*Environmental Pollution*, 231, 1552–1559.

<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.09.043>

Avio, C. G., Gorbi, S., & Regoli, F. (2017). Plastics and microplastics in the oceans: From emerging pollutants to emerged threat. *Marine Environmental Research*, 128, 2–11.

<https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2016.05.012>

Bakir, A., Rowland, S. J., & Thompson, R. C. (2014). Enhanced desorption of persistent organic pollutants from microplastics under simulated physiological conditions.

*Environmental Pollution*, 185, 16–23. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.10.007>

Besley, A., Vijver, M. G., Behrens, P., & Bosker, T. (2017). A standardized method for sampling and extraction methods for quantifying microplastics in beach sand.

*Marine Pollution Bulletin*, 114(1), 77–83.

<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.08.055>

Beyler, C. L., & Hirschler, M. M. (2002). *Thermal Decomposition of Polymers*. 22.

Bhuvanewari, G. H. (2018). Degradability of Polymers. En *Recycling of Polyurethane Foams* (pp. 29–44). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-51133-9.00003-6>

Bonten, C. (2019). *Plastics Technology: Introduction and Fundamentals*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG. <https://doi.org/10.3139/9781569907689>

Bottino, F. A., Cinquegrani, A. R., Di Pasquale, G., Leonardi, L., & Pollicino, A. (2004).

Chemical modifications, mechanical properties and surface photo-oxidation of films of polystyrene (PS). *Polymer Testing*, 23(4), 405–411.

<https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2003.10.001>

- Bui, X.-T., Fujioka, T., & Nghiem, L. D. (2021). Green Technologies for Sustainable Water (GTSW). *Environmental Technology & Innovation*, 21, 101192. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101192>
- Bunse, K., Vodicka, M., Schönsleben, P., Brühlhart, M., & Ernst, F. O. (2011). Integrating energy efficiency performance in production management – gap analysis between industrial needs and scientific literature. *Journal of Cleaner Production*, 19(6–7), 667–679. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.11.011>
- Cashman, M. A., Ho, K. T., Boving, T. B., Russo, S., Robinson, S., & Burgess, R. M. (2020). Comparison of microplastic isolation and extraction procedures from marine sediments. *Marine Pollution Bulletin*, 159, 111507. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111507>
- Ceballos, C. (2003). *ESTADO DE LAS PLAYAS EN COLOMBIA*. 127.
- Chapa, O. (2005). *Diseño de equipo para molienda y lavado de PET*.
- Chorghe, D., Sari, M. A., & Chellam, S. (2017). Boron removal from hydraulic fracturing wastewater by aluminum and iron coagulation: Mechanisms and limitations. *Water Research*, 126, 481–487. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.09.057>
- Claessens, M., Van Cauwenberghe, L., Vandegehuchte, M. B., & Janssen, C. R. (2013). New techniques for the detection of microplastics in sediments and field collected organisms. *Marine Pollution Bulletin*, 70(1–2), 227–233. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.03.009>
- Comisión ODS Colombia. (2018). *Reporte Nacional Voluntario para Colombia en relación a los ODS*.

<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Reporte%20Nacional%20Voluntario%20Colombia%20ODS.pdf>

CONPES 3918, C. N. de P. E. y S. (2018). *CONPES 3918 Estrategia para la implementación de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) en Colombia.*

<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3918.pdf>

Coreño-Alonso, J., & Méndez-Bautista, M. T. (2010). Relación estructura-propiedades de polímeros. *Educación Química*, 21(4), 291–299. [https://doi.org/10.1016/S0187-893X\(18\)30098-3](https://doi.org/10.1016/S0187-893X(18)30098-3)

Crawford, R. J., & Martin, P. J. (2020). General properties of plastics. En *Plastics Engineering* (pp. 1–57). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100709-9.00001-7>

Delgado, S., Villarroel, R., Gonzalez, E., & Morales, M. (2011). Aerobic Membrane Bioreactor for Wastewater Treatment – Performance Under Substrate-Limited Conditions. En M. D. Matovic (Ed.), *Biomass—Detection, Production and Usage*. InTech. <https://doi.org/10.5772/17409>

Delvalle de Borrero, D., Fábrega Duque, J., Olmos, J., Garcés-Ordóñez, O., Amaral, S. S. G. do, Vezzone, M., de Sá Felizardo, J. P., & Meigikos dos Anjos, R. (2020). Distribution of Plastic Debris in the Pacific and Caribbean Beaches of Panama. *Air, Soil and Water Research*, 13, 117862212092026. <https://doi.org/10.1177/1178622120920268>

Departamento Nacional de Planeación. (2017). *Energy Demand Situation in Colombia.* <https://www.dnp.gov.co/Crecimiento-Verde/Documents/ejes-tematicos/Energia/MCV%20-%20Energy%20Demand%20Situation%20VF.pdf>

- DIMAR. (2021). *Zonificación de Playas*.  
<https://dimar.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=691969e7f3f74b9e9d290df0b2b1832d>
- Eriksen, M., Lebreton, L. C. M., Carson, H. S., Thiel, M., Moore, C. J., Borerro, J. C., Galgani, F., Ryan, P. G., & Reisser, J. (2014). Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea. *PLoS ONE*, 9(12), e111913. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111913>
- Fisher, M. M. (2004). Plastics Recycling. En A. L. Andrady (Ed.), *Plastics and the Environment* (pp. 563–627). John Wiley & Sons, Inc.  
<https://doi.org/10.1002/0471721557.ch14>
- Fombuena, V., Fenollar, O. A., & Montañes, N. (2016). *Caracterización de materiales poliméricos*. Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia.  
<https://bdbiblioteca.universidadean.edu.co:2091/lib/bibliotecaeansp/reader.action?docID=4721921&query=estructura+molecular+de+los+polimeros>
- Fundación Centro de Recursos Ambientales de Navarra. (2014). *Las causas*.  
[http://www.crana.org/es/residuos/mas-informacion\\_6/las-causas](http://www.crana.org/es/residuos/mas-informacion_6/las-causas)
- Garcés, O., Castillo, V. A., Rueda, R., Rios, M. A., Bayona, M., Molina, F., & Escobar, M. I. (2018). *Diagnóstico de residuos microplásticos en las zonas marinas*. 122.
- Garcés-Ordóñez, O., Espinosa, L. F., Cardoso, R. P., Issa Cardozo, B. B., & Meigikos dos Anjos, R. (2020). Plastic litter pollution along sandy beaches in the Caribbean and Pacific coast of Colombia. *Environmental Pollution*, 267, 115495.  
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115495>

- Getor, R. Y., Mishra, N., & Ramudhin, A. (2020). The role of technological innovation in plastic production within a circular economy framework. *Resources, Conservation and Recycling*, 163, 105094. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105094>
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Gómez-Cubillos, M. C., Licero, L., Perdomo, L., Rodríguez, A., Romero, D., Ballesteros, D., Gómez, D., Melo, A., Chasqui, L., Ocampo, M. A., Carvajal, D., García, J., Peña, C., Bastidas, M., & Ricarurte, C. (2015). *Portafolio Áreas de Arrecifes de Coral Pastos Marinos Playas de Arena y Manglares con Potencial de Restauración en Colombia*. 72.
- González, W., & Mancini, H. (2005). *Ciencia de los materiales*. <https://bdbiblioteca.universidadean.edu.co:2091/lib/bibliotecaeansp/reader.action?docID=3159967&query=estructura+molecular+de+los+polimeros>
- Google. (2021). *Google Earth*. <https://www.google.com/intl/es/earth/>
- Google Maps. (2021). Google Maps. <https://www.google.com/maps/@5.6335484,-73.3435528,11.92z>
- Gracia C., A., Rangel-Buitrago, N., & Flórez, P. (2018). Beach litter and woody-debris colonizers on the Atlantico department Caribbean coastline, Colombia. *Marine Pollution Bulletin*, 128, 185–196. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.01.017>
- Greenpeace Colombia. (2018). *Greenpeace anuncia campaña para frenar el avance del plástico en Colombia*. <https://www.greenpeace.org/colombia/>

- Gug, J., Cacciola, D., & Sobkowicz, M. J. (2015). Processing and properties of a solid energy fuel from municipal solid waste (MSW) and recycled plastics. *Waste Management*, 35, 283–292. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.09.031>
- Guoliang, W. (2011). *A new concept of green education: The cultivation model for successful and practical talents*. [https://scholar.googleusercontent.com/scholar?q=cache:1nwv\\_i0awDcJ:scholar.google.com/+Guoliang+W+\(2011\)+A+new+concept+of+green+education:+the+cultivation+model+for+successful+and+practical+talents&hl=es&as\\_sdt=0,5](https://scholar.googleusercontent.com/scholar?q=cache:1nwv_i0awDcJ:scholar.google.com/+Guoliang+W+(2011)+A+new+concept+of+green+education:+the+cultivation+model+for+successful+and+practical+talents&hl=es&as_sdt=0,5)
- Hartmann, N. B., Hüffer, T., Thompson, R. C., Hassellöv, M., Verschoor, A., Daugaard, A. E., Rist, S., Karlsson, T., Brennholt, N., Cole, M., Herrling, M. P., Hess, M. C., Ivleva, N. P., Lusher, A. L., & Wagner, M. (2019). Are We Speaking the Same Language? Recommendations for a Definition and Categorization Framework for Plastic Debris. *Environmental Science & Technology*, 53(3), 1039–1047. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05297>
- He, X., Li, H., & Zhu, J. (2019). A value-added insight of reusing microplastic waste: Carrier particle in fluidized bed bioreactor for simultaneous carbon and nitrogen removal from septic wastewater. *Biochemical Engineering Journal*, 151, 107300. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2019.107300>
- Herberg, A., Yu, X., & Kuckling, D. (2019). Responsive polymers as smart carriers in tunable catalytic processes. En *Smart Polymer Catalysts and Tunable Catalysis* (pp. 115–147). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811840-5.00006-X>
- Hidalgo-Ruz, V., Gutow, L., Thompson, R. C., & Thiel, M. (2012). Microplastics in the Marine Environment: A Review of the Methods Used for Identification and

- Quantification. *Environmental Science & Technology*, 46(6), 3060–3075.  
<https://doi.org/10.1021/es2031505>
- Hopewell, J., Dvorak, R., & Kosior, E. (2009). Plastics recycling: Challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2115–2126. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0311>
- Hosler, D. (1999). Prehistoric Polymers: Rubber Processing in Ancient Mesoamerica. *Science*, 284(5422), 1988–1991. <https://doi.org/10.1126/science.284.5422.1988>
- Hou, L., Kumar, D., Yoo, C. G., Gitsov, I., & Majumder, E. L.-W. (2021). Conversion and removal strategies for microplastics in wastewater treatment plants and landfills. *Chemical Engineering Journal*, 406, 126715.  
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126715>
- Huang, W., Chen, M., Song, B., Deng, J., Shen, M., Chen, Q., Zeng, G., & Liang, J. (2020). Microplastics in the coral reefs and their potential impacts on corals: A mini-review. *Science of The Total Environment*, 143112.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143112>
- Huang, W., Song, B., Liang, J., Niu, Q., Zeng, G., Shen, M., Deng, J., Luo, Y., Wen, X., & Zhang, Y. (2020). Microplastics and associated contaminants in the aquatic environment: A review on their ecotoxicological effects, trophic transfer, and potential impacts to human health. *Journal of Hazardous Materials*, 124187.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124187>
- Hubo, S., Ragaert, K., Leite, L., & Martins, C. (s/f). *Evaluation of post-industrial and post-consumer polyolefin-based polymer waste streams for injection moulding*. 6.
- ICONTEC. (1991). *NTC 3205*.

- Ignatyev, I. A., Thielemans, W., & Vander Beke, B. (2014). Recycling of Polymers: A Review. *ChemSusChem*, 7(6), 1579–1593. <https://doi.org/10.1002/cssc.201300898>
- INCODER, & Universidad Jorge Tadeo Lozano. (2014). *Ambiente y desarrollo en el caribe colombiano*. <http://observatorio.epacartagena.gov.co/ftp-uploads/pub-irsb-ambiente-y-desarrollo-en-el-caribe-colombiano-parte-1.pdf>
- Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives De Andrés” - INVEMAR. (2017). *Formulación de Lineamientos, Medidas de Conservación, Manejo y Uso de Ecosistemas Marinos y Costeros, con la intención de apoyar acciones de Fortalecimiento en la Gestión Ambiental de las Zonas Costeras de Colombia*. [http://cinto.invemar.org.co/alfresco/d/d/workspace/SpacesStore/a57de729-ff38-4062-b0ae-296a37bbc8fa/Diagn%C3%B3stico%20de%20residuos%20micropl%C3%A1sticos%20en%20las%20zonas%20marinas?ticket=TICKET\\_f71c77acad0c221d17760130911f8d9859f42dd9](http://cinto.invemar.org.co/alfresco/d/d/workspace/SpacesStore/a57de729-ff38-4062-b0ae-296a37bbc8fa/Diagn%C3%B3stico%20de%20residuos%20micropl%C3%A1sticos%20en%20las%20zonas%20marinas?ticket=TICKET_f71c77acad0c221d17760130911f8d9859f42dd9)
- Isobe, A., Iwasaki, S., Uchida, K., & Tokai, T. (2019). Abundance of non-conservative microplastics in the upper ocean from 1957 to 2066. *Nature Communications*, 10(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-08316-9>
- Kang, J., Zhou, L., Duan, X., Sun, H., Ao, Z., & Wang, S. (2019). Degradation of Cosmetic Microplastics via Functionalized Carbon Nanosprings. *Matter*, 1(3), 745–758. <https://doi.org/10.1016/j.matt.2019.06.004>

- Keane, M. A. (2010). Catalytic processing of waste polymer composites. En *Management, Recycling and Reuse of Waste Composites* (pp. 122–151). Elsevier.  
<https://doi.org/10.1533/9781845697662.2.122>
- Kobayashi, S., Uyama, H., & Kadokawa, J. (Eds.). (2019). *Enzymatic Polymerization towards Green Polymer Chemistry*. Springer Singapore.  
<https://doi.org/10.1007/978-981-13-3813-7>
- Kobayashi, S., Uyama, H., & Ohmae, M. (2001). Enzymatic Polymerization for Precision Polymer Synthesis. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, 74(4), 613–635.  
<https://doi.org/10.1246/bcsj.74.613>
- Kosuth, M., Wattenberg, E., Mason, S., Tyree, C., & Morrison, D. (2017). *Synthetic polymer contamination in global drinking water*.  
[https://orbmedia.org/stories/Invisibles\\_final\\_report](https://orbmedia.org/stories/Invisibles_final_report)
- Kulkarni, G. S. (2018). Introduction to Polymer and Their Recycling Techniques. En *Recycling of Polyurethane Foams* (pp. 1–16). Elsevier.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-51133-9.00001-2>
- Lares, M., Ncibi, M. C., Sillanpää, M., & Sillanpää, M. (2018). Occurrence, identification and removal of microplastic particles and fibers in conventional activated sludge process and advanced MBR technology. *Water Research*, 133, 236–246.  
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.01.049>
- Lebreton, L., & Andrady, A. (2019). Future scenarios of global plastic waste generation and disposal. *Palgrave Communications*, 5(1), 1–11. <https://doi.org/10.1057/s41599-018-0212-7>

- Lebreton, L. C. M., van der Zwet, J., Damsteeg, J.-W., Slat, B., Andrady, A., & Reisser, J. (2017). River plastic emissions to the world's oceans. *Nature Communications*, 8(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/ncomms15611>
- Lee, H.-J., Song, N.-S., Kim, J.-S., & Kim, S.-K. (2021). Variation and Uncertainty of Microplastics in Commercial Table Salts: Critical Review and Validation. *Journal of Hazardous Materials*, 402, 123743. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123743>
- López, F., & Mendizábal, E. (2015). *Introducción a la ciencia de los polímeros* (Primera). Universidad de Guadalajara.
- Malinauskaite, J., Jouhara, H., Egilegor, B., Al-Mansour, F., Ahmad, L., & Pusnik, M. (2020). Energy efficiency in the industrial sector in the EU, Slovenia, and Spain. *Energy*, 208, 118398. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118398>
- Mansour, S., Knani, S., Bensouilah, R., & Ksibi, Z. (2020). Wastewater problems and treatments. En *Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes* (pp. 151–174). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816778-6.00008-4>
- Mastellone, M. L., Perugini, F., Ponte, M., & Arena, U. (2002). Fluidized bed pyrolysis of a recycled polyethylene. *Polymer Degradation and Stability*, 76(3), 479–487. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(02\)00052-6](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(02)00052-6)
- May, G., Barletta, I., Stahl, B., & Taisch, M. (2015). Energy management in production: A novel method to develop key performance indicators for improving energy efficiency. *Applied Energy*, 149, 46–61. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.065>

- Melin, T., Jefferson, B., Bixio, D., Thoeye, C., De Wilde, W., De Koning, J., van der Graaf, J., & Wintgens, T. (2006). Membrane bioreactor technology for wastewater treatment and reuse. *Desalination*, *187*(1–3), 271–282. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.04.086>
- Mesa Nacional para la Gestión Sostenible del Plástico. (2019). *Plan Nacional para la Gestión Sostenible de los Plásticos de un solo uso*. [https://www.minambiente.gov.co/images/Atencion\\_y\\_participacion\\_al\\_ciudadano/consultas\\_publicas\\_2019/Plan\\_nacional\\_para\\_la\\_gestion\\_sostenible\\_del\\_plastico\\_de\\_un\\_solo\\_uso\\_consulta.docx](https://www.minambiente.gov.co/images/Atencion_y_participacion_al_ciudadano/consultas_publicas_2019/Plan_nacional_para_la_gestion_sostenible_del_plastico_de_un_solo_uso_consulta.docx)
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2019). *Presidentes de la Alianza del Pacífico suscribieron la Declaración sobre la Gestión Sostenible de los Plásticos*. <http://www.minambiente.gov.co/index.php/noticias-minambiente/4364-presidentes-de-la-alianza-del-pacifico-suscribieron-la-declaracion-sobre-la-gestion-sostenible-de-los-plasticos>
- Moran, M. (2015, enero 14). Consumo y producción sostenibles. *Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-consumption-production/>
- Murata, K., Hirano, Y., Sakata, Y., & Uddin, Md. A. (2002). Basic study on a continuous flow reactor for thermal degradation of polymers. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *65*(1), 71–90. [https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(01\)00181-4](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(01)00181-4)
- Murphy, F., Ewins, C., Carbonnier, F., & Quinn, B. (2016). Wastewater Treatment Works (WwTW) as a Source of Microplastics in the Aquatic Environment. *Environmental Science & Technology*, *50*(11), 5800–5808. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05416>

- Naciones Unidas. (2003). *Environmentally Sound Technologies for Sustainable Development*. ResearchGate. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1682.1928>
- Naushad, Mu., Rajendran, S., & Lichtfouse, E. (Eds.). (2020). *Green Methods for Wastewater Treatment* (Vol. 35). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-16427-0>
- Novoselov, Yu., Bogutsky, V., & Shron, L. (2017). Patterns of Removing Material in Workpiece—Grinding Wheel Contact Area. *Procedia Engineering*, 206, 991–996. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.583>
- Oehlmann, J., Schulte-Oehlmann, U., Kloas, W., Jagnytsch, O., Lutz, I., Kusk, K. O., Wollenberger, L., Santos, E. M., Paull, G. C., Look, K. J. W. V., & Tyler, C. R. (2009). A critical analysis of the biological impacts of plasticizers on wildlife. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2047–2062. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0242>
- Olabi, A. G. (2013). State of the art on renewable and sustainable energy. *Energy*, 61, 2–5. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.10.013>
- Pabortsava, K., & Lampitt, R. S. (2020). High concentrations of plastic hidden beneath the surface of the Atlantic Ocean. *Nature Communications*, 11(1), 4073. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17932-9>
- Padervand, M., Lichtfouse, E., Robert, D., & Wang, C. (2020). Removal of microplastics from the environment. A review. *Environmental Chemistry Letters*, 18(3), 807–828. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-00983-1>
- Pakowski, Z., & Mujumdar, A. (2007). *Basic Process Calculations and Simulations in Drying* (pp. 53–80). <https://doi.org/10.1201/9781420017618.ch3>

- Panigrahi, J., & Sharma, S. C. (2014). Simulation, Control, and Optimization of Water Systems in Industrial Plants. En *Industrial Wastewater Treatment, Recycling and Reuse* (pp. 463–487). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-099968-5.00012-X>
- Parres, F. J. G. (2005). *Investigación de las variables limitantes en la recuperación de residuos de poliestireno procedentes del sector envase*. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA.
- Payne, J., McKeown, P., & Jones, M. D. (2019). A circular economy approach to plastic waste. *Polymer Degradation and Stability*, 165, 170–181. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2019.05.014>
- Pérez, M., Hernández, H., & Martínez, V. M. (2005). *Curso de química orgánica V*. Instituto Politécnico Nacional.
- Pincheira, M., Vecchio, M., Giaffreda, R., & Kanhere, S. S. (2021). Cost-effective IoT devices as trustworthy data sources for a blockchain-based water management system in precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 180, 105889. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105889>
- Plastics Europe. (2017). *Plastics – the Facts 2017*. [https://www.plasticseurope.org/application/files/1715/2111/1527/Plastics\\_the\\_facts\\_2017\\_FINAL\\_for\\_website.pdf](https://www.plasticseurope.org/application/files/1715/2111/1527/Plastics_the_facts_2017_FINAL_for_website.pdf)
- Plastics Europe. (2019). *Plastics – the Facts 2019*. [https://www.plasticseurope.org/application/files/9715/7129/9584/FINAL\\_web\\_version\\_Plastics\\_the\\_facts2019\\_14102019.pdf](https://www.plasticseurope.org/application/files/9715/7129/9584/FINAL_web_version_Plastics_the_facts2019_14102019.pdf)

- PlasticsEurope. (2018). *Reciclaje y recuperación de energía*.  
<https://www.plasticseurope.org/es/focus-areas/circular-economy/zero-plastics-landfill/recycling-and-energy-recovery>
- Poerio, Piacentini, & Mazzei. (2019). Membrane Processes for Microplastic Removal. *Molecules*, 24(22), 4148. <https://doi.org/10.3390/molecules24224148>
- Pohjakallio, M., Vuorinen, T., & Oasmaa, A. (2020). Chemical routes for recycling—Dissolving, catalytic, and thermochemical technologies. En *Plastic Waste and Recycling* (pp. 359–384). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817880-5.00013-X>
- Purca, S., & Henostroza, A. (2017). Presencia de microplásticos en cuatro playas arenosas de Perú. *Revista Peruana de Biología*, 24(1), 101. <https://doi.org/10.15381/rpb.v24i1.12724>
- Ragaert, K., Delva, L., & Van Geem, K. (2017). Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*, 69, 24–58. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044>
- Rangel-Buitrago, N., Mendoza, A. V., Mantilla-Barbosa, E., Arroyo-Olarte, H., Arana, V. A., Trilleras, J., Gracia C, A., Neal, W. J., & Williams, A. T. (2020). Plastic pollution on the Colombian central Caribbean beaches. *Marine Pollution Bulletin*, 111837. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111837>
- Reyes Giraldo, M. (2013). *Simulador Financiero*.
- Rojo-Nieto, E., & Montoto Martínez, T. (2017). *Basuras marinas, plásticos y microplásticos: Orígenes, impactos y consecuencias de una amenaza global*. Ecologistas en Acción. <https://accedacris.ulpgc.es/jspui/handle/10553/56275>

- Rosenberg, E., Lind, A., & Espegren, K. A. (2013). The impact of future energy demand on renewable energy production – Case of Norway. *Energy*, *61*, 419–431. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.08.044>
- Sáez, A., & Urdaneta G., J. A. (2014). Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. *Omnia*, *20*(3). <http://www.redalyc.org/resumen.oa?id=73737091009>
- Saleem, J., Adil Riaz, M., & Gordon, M. (2018). Oil sorbents from plastic wastes and polymers: A review. *Journal of Hazardous Materials*, *341*, 424–437. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.07.072>
- Sánchez, A. S. (2021). Chapter Nine - Toward “Zero Liquid Discharge” industrial facilities: Reducing the impact on freshwater resources by reusing industrial and urban wastewaters. En C. M. Hussain (Ed.), *Concepts of Advanced Zero Waste Tools* (pp. 215–246). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822183-9.00009-X>
- Scopetani, C., Chelazzi, D., Mikola, J., Leiniö, V., Heikkinen, R., Cincinelli, A., & Pellinen, J. (2020). Olive oil-based method for the extraction, quantification and identification of microplastics in soil and compost samples. *Science of The Total Environment*, *733*, 139338. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139338>
- Senathirajah, K., Attwood, S., Bhagwat, G., Carbery, M., Wilson, S., & Palanisami, T. (2021). Estimation of the mass of microplastics ingested – A pivotal first step towards human health risk assessment. *Journal of Hazardous Materials*, *404*, 124004. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124004>
- Sheel, A., & Pant, D. (2019). Chemical Depolymerization of PET Bottles via Glycolysis. En *Recycling of Polyethylene Terephthalate Bottles* (pp. 61–84). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811361-5.00004-3>

- Sheldon, R. A., & Norton, M. (2020). Green chemistry and the plastic pollution challenge: Towards a circular economy. *Green Chemistry*, 22(19), 6310–6322. <https://doi.org/10.1039/D0GC02630A>
- Shim, W. J., Hong, S. H., & Eo, S. (2018). Marine Microplastics: Abundance, Distribution, and Composition. En *Microplastic Contamination in Aquatic Environments* (pp. 1–26). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813747-5.00001-1>
- Shirasaki, N., Matsushita, T., Matsui, Y., & Marubayashi, T. (2016). Effect of aluminum hydrolyte species on human enterovirus removal from water during the coagulation process. *Chemical Engineering Journal*, 284, 786–793. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.09.045>
- Singh, B., & Sharma, N. (2008). Mechanistic implications of plastic degradation. *Polymer Degradation and Stability*, 93(3), 561–584. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2007.11.008>
- Singh, M., & Ahmed, S. (2020). IoT based smart water management systems: A systematic review. *Materials Today: Proceedings*, S2214785320364701. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.588>
- Singh, R., Kumar, N., Mehrotra, T., Bisaria, K., & Sinha, S. (2020). *Environmental hazards and biodegradation of plastic waste: Challenges and future prospects*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128205242000092>
- Siperintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2019). *Informe Sectorial de la Actividad de Aprovechamiento – 2018*. [https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Publicaciones/Publicaciones/2020/Ene/informe\\_sectorial\\_aprovechamiento\\_2018.pdf](https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Publicaciones/Publicaciones/2020/Ene/informe_sectorial_aprovechamiento_2018.pdf)

- Sol, D., Laca, A., Laca, A., & Díaz, M. (2020). Approaching the environmental problem of microplastics: Importance of WWTP treatments. *Science of The Total Environment*, 740, 140016. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140016>
- Sturzenegger, G. (2014, mayo 16). ¿Sabes cuánta basura generas en un día? *Volvamos a la fuente*. <https://blogs.iadb.org/agua/2014/05/16/sabes-cuanta-basura-generas-en-un-dia/>
- Sun, J., Dai, X., Wang, Q., van Loosdrecht, M. C. M., & Ni, B.-J. (2019). Microplastics in wastewater treatment plants: Detection, occurrence and removal. *Water Research*, 152, 21–37. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.12.050>
- SuperPro Design*. (2000). Intelligen Inc.
- Thompson, R. C. (2015). Microplastics in the Marine Environment: Sources, Consequences and Solutions. En *Marine Anthropogenic Litter*. Springer Open.
- Thushari, G. G. N., & Senevirathna, J. D. M. (2020). Plastic pollution in the marine environment. *Heliyon*, 6(8), e04709. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04709>
- Tofa, T. S., Kunjali, K. L., Paul, S., & Dutta, J. (2019). Visible light photocatalytic degradation of microplastic residues with zinc oxide nanorods. *Environmental Chemistry Letters*, 17(3), 1341–1346. <https://doi.org/10.1007/s10311-019-00859-z>
- Tofa, T. S., Ye, F., Kunjali, K. L., & Dutta, J. (2019). Enhanced Visible Light Photodegradation of Microplastic Fragments with Plasmonic Platinum/Zinc Oxide Nanorod Photocatalysts. *Catalysts*, 9(10), 819. <https://doi.org/10.3390/catal9100819>
- Török, B., & Dransfield, T. (2018). Green Chemistry. En *Green Chemistry* (pp. 3–16). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809270-5.00001-7>

- UNESCO. (2019, mayo). *Nuestra agua para nuestro mundo: La Conferencia Internacional del Agua de la UNESCO pide un cambio de paradigma hacia la seguridad del agua para una paz sostenible*. UNESCO. <https://es.unesco.org/news/nuestra-agua-nuestro-mundo-conferencia-internacional-del-agua-unesco-pide-cambio-paradigma>
- UNESCO b. (2019). *Informe Mundial de Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019: No dejar a nadie atrás*. UN. <https://doi.org/10.18356/e96937a1-es>
- Universidad Ean. (2014). *La Universidad | Institucional*. Universidad Ean. <https://universidadean.edu.co/es/la-universidad>
- Uribe, M., & Mehrenberger, P. (2010). *Los polímeros*. Instituto Politécnico Nacional.
- van Sebille, E., England, M. H., & Froyland, G. (2012). Origin, dynamics and evolution of ocean garbage patches from observed surface drifters. *Environmental Research Letters*. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/7/4/044040/pdf>
- Walker, T., Gramlich, D., & Dumont-Bergeron, A. (2020). The Case for a Plastic Tax: A Review of Its Benefits and Disadvantages Within a Circular Economy. En D. M. Wasieleski & J. Weber (Eds.), *Business and Society 360* (pp. 185–211). Emerald Publishing Limited. <https://doi.org/10.1108/S2514-175920200000004010>
- Wang, X., Bolan, N., Tsang, D. C. W., Sarkar, B., Bradney, L., & Li, Y. (2021). A review of microplastics aggregation in aquatic environment: Influence factors, analytical methods, and environmental implications. *Journal of Hazardous Materials*, 402, 123496. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123496>

- Welden, N. A., & Cowie, P. R. (2017). Degradation of common polymer ropes in a sublittoral marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, 118(1–2), 248–253. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.02.072>
- Welden, N. A., & Lusher, A. (2020). Microplastics. En *Plastic Waste and Recycling* (pp. 223–249). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817880-5.00009-8>
- Wen, X., Cao, H., Hon, B., Chen, E., & Li, H. (2021). Energy value mapping: A novel lean method to integrate energy efficiency into production management. *Energy*, 217, 119353. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119353>
- WWF, Ellen MacArthur Foundation, & Boston Consulting Group. (2020). *The business case for a un treaty on plastic pollution*.
- Xiao, K., Liang, S., Wang, X., Chen, C., & Huang, X. (2019). Current state and challenges of full-scale membrane bioreactor applications: A critical review. *Bioresource Technology*, 271, 473–481. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.09.061>
- Yaranal, N. A., Subbiah, S., & Mohanty, K. (2020). Identification, extraction of microplastics from edible salts and its removal from contaminated seawater. *Environmental Technology & Innovation*, 101253. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101253>
- Young, R. J., & Lovell, P. A. (2011). *Introduction to Polymers* (Third). CRC Press.
- Yousif, E., & Haddad, R. (2013). Photodegradation and photostabilization of polymers, especially polystyrene: Review. *SpringerPlus*, 2(1), 398. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-398>

- Yuan, J., Ma, J., Sun, Y., Zhou, T., Zhao, Y., & Yu, F. (2020). Microbial degradation and other environmental aspects of microplastics/plastics. *Science of The Total Environment*, 715, 136968. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136968>
- Zhang, F., Zhao, Y., Wang, D., Yan, M., Zhang, J., Zhang, P., Ding, T., Chen, L., & Chen, C. (2020). Current technologies for plastic waste treatment: A review. *Journal of Cleaner Production*, 124523. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124523>
- Zhang, Z., Wu, H., Peng, G., Xu, P., & Li, D. (2020). Coastal ocean dynamics reduce the export of microplastics to the open ocean. *Science of The Total Environment*, 713, 136634. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136634>
- Zhou, D., Chen, L., Li, J., & Wu, F. (2018). Transition metal catalyzed sulfite auto-oxidation systems for oxidative decontamination in waters: A state-of-the-art minireview. *Chemical Engineering Journal*, 346, 726–738. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.04.016>
- Ziajahromi, S., Neale, P. A., Rintoul, L., & Leusch, F. D. L. (2017). Wastewater treatment plants as a pathway for microplastics: Development of a new approach to sample wastewater-based microplastics. *Water Research*, 112, 93–99. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.01.042>
- Zobkov, M., Zobkova, M., Galakhina, N., & Efremova, T. (2020). Method for microplastics extraction from Lake sediments. *MethodsX*, 101140. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2020.101140>
- Zurier, H. S., & Goddard, J. M. (2021). Biodegradation of microplastics in food and agriculture. *Current Opinion in Food Science*, 37, 37–44. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.09.001>

