Identificación de tecnologías de bajo costo para la valorización de residuos de plástico PET, en el ámbito del reciclaje de oficio de la localidad de Suba en Bogotá

Monica Alexandra Gomez Casallas

2202-017

Universidad El Bosque

Facultad de Ingeniería

Programa Ingeniería Ambiental

Bogotá, noviembre de 2022

Identificación de tecnologías de bajo costo para la valorización de residuos de plástico PET, en el ámbito del reciclaje de oficio de la localidad de Suba en Bogotá

Monica Alexandra Gomez Casallas

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Ambiental

Director:
Jhon Fredy Arias Duque

Línea de Investigación:
Ingeniería para la sostenibilidad, ecología industrial y gestión integral sustentable

Universidad El Bosque

Facultad de Ingeniería

Programa Ingeniería Ambiental

Bogotá, Colombia

2022

Nota de Salvedad de Responsabilidad Institucional

La Universidad El Bosque, no se hace responsable de los conceptos emitidos por los investigadores en su trabajo, solo velará por el rigor científico, metodológico y ético del mismo en aras de la búsqueda de la verdad y la justicia.

Tabla de Contenido

Resumen **10**

Abstract … **10**

1. Introducción **11**

2. Planteamiento del problema **12**

2.1 Pregunta de investigación **15**

3. Justificación **16**

3.1 Pertinencia **16**

3.2 Impacto **17**

4. Objetivos **18**

4.1 Objetivo general **18**

4.2 Objetivos específicos **18**

5. Marco de referencia **19**

5.1 Estado del arte **19**

5.2 Marco conceptual **21**

5.3 Marco teórico **26**

5.3.1 Contexto de los residuos plásticos a nivel nacional 26

5.3.2 Economía circular en Colombia respecto al plástico 28

5.3.3 Impacto ambiental de los residuos de plástico PET 33

5.3.4 La gestión y manejo de residuos en Bogotá 34

5.3.5 Panorama de la población recicladora en la ciudad de Bogotá 37

5.3.6 Análisis cuantitativo de información: bibliometría 40

5.3.7 Análisis multicriterio 42

5.4 Marco geográfico **43**

5.5 Marco legal y normativo **46**

5.6 Marco institucional **49**

6. Metodología 53

6.1 Enfoque de la investigación 53

6.2 Alcance del proyecto 53

6.3 Método 54

6.4 Metodología general 54

6.5 Metodología por objetivos 55

7. Aspectos Éticos 64

8. Resultados, análisis y discusión 64

8.1 Análisis del panorama investigativo actual, tanto global como local, sobre las tecnologías existentes para la transformación y reciclaje de plástico PET 64

8.1.1 Tendencias investigativas a nivel mundial sobre el reciclaje de plástico PET 64

8.1.2 Principales tecnologías para la transformación y reciclaje de plástico PET. 73

8.2 Priorización de las tecnologías más acordes al contexto del reciclaje en Suba para la transformación del plástico PET 91

8.2.1 Selección de criterios de calificación y comparación 91

8.2.2 Coeficientes de importancia Relativa (CIR) de cada criterio 92

8.2.3 Jerarquización de los criterios según su porcentaje de peso 93

8.2.4 Opciones de decisión (alternativas a priorizar) 94

8.2.5 Coeficientes de Selección Ambiental (CSA) 99

8.2.6 Matriz de decisión (relación de los CSA y los CIR) 106

8.3 Planteamiento de la hoja de ruta para la implementación de un proyecto piloto de una de las tecnologías priorizadas 109

8.3.1 Información general de la hoja de ruta 109

8.3.2 Cronograma general de aplicación 112

8.3.3 Recursos necesarios y requerimientos adicionales 112

8.3.4 Beneficios esperados 114

9. Conclusiones 115

10. Recomendaciones 117

11. Referencias bibliográficas 118

Anexos …..... 133

Listado de Tablas

Tabla 1. Clasificación de los plásticos. 23

Tabla 2. Productos plásticos de un sólo uso prohibidos por la ley 2232 de 2022..... 28

Tabla 3. Principales beneficios de impulsar la economía circular en Colombia. 29

Tabla 4. Cantidades de PET trabajadas por las empresas de transformación de plástico en Bogotá..... 32

Tabla 5. Principales impactos ambientales causados por la inadecuada gestión de residuos de PET. .. 33

Tabla 6. Panorama de comercialización de reciclaje en Bogotá a julio de 2022. 39

Tabla 7. Precios promedio del mercado de reciclaje en Colombia y en Bogotá a agosto de 2022..... 40

Tabla 8. Pasos y pautas generales para realizar un análisis bibliométrico. 41

Tabla 9. Organizaciones de recicladores de la localidad de Suba, registradas en el RUOR. 45

Tabla 10. Normativa nacional. 46

Tabla 11. Normativa internacional. 48

Tabla 12. Metodología general de trabajo. 54

Tabla 13. Normalización de términos con el tesauro de la UNESCO. 55

Tabla 14 . Normalización de términos con el Tesauro Ambiental para Colombia. 56

Tabla 15. Normalización de términos con el tesauro de Engineering Village. 56

Tabla 16. Ecuaciones de búsqueda empleadas para la recuperación de información. 57

Tabla 17. Escala de Saaty de preferencias. 59

Tabla 18. Características de los diferentes sistemas de peletizado de plástico. 88

Tabla 19. Criterios para la priorización de tecnologías para transformación de PET. 91

Tabla 20. Matriz de calificación de criterios según la metodología AHP. 92

Tabla 21. Matriz normalizada para definir el peso de cada criterio. 93

Tabla 22. Criterios ordenados de mayor a menor según su peso de importancia. 93

Tabla 23. Evaluación del proceso de compactación vertical respecto a los criterios. 94

Tabla 24. Evaluación del proceso de triturado respecto a los criterios. 95

Tabla 25. Evaluación del proceso de peletización de filamentos o hebras respecto a los criterios. 96

Tabla 26. Evaluación del proceso de peletización de anillo de agua respecto a los criterios. 97

Tabla 27. Evaluación del proceso de extrusión de láminas respecto a los criterios..... 98

Tabla 28. Evaluación de las alternativas respecto al criterio de inversión e infraestructura. 99

Tabla 29. Evaluación de las alternativas respecto al criterio de residuos y emisiones. 100

Tabla 30. Evaluación de las alternativas respecto al criterio de idoneidad. 101

Tabla 31. Evaluación de las alternativas respecto al criterio de requerimientos en cuanto a salud y seguridad. 101

Tabla 32. Evaluación de las alternativas respecto al criterio de mano de obra requerida. 102

Tabla 33. Evaluación de las alternativas respecto al criterio de consumo de recursos. 103

Tabla 34. Evaluación de las alternativas respecto al criterio de beneficios sociales. 103

Tabla 35. Evaluación de las alternativas respecto al criterio de eficiencia y cantidad de productos generados. 104

Tabla 36. Evaluación de las alternativas respecto al criterio de ciclos cerrados. 105

Tabla 37. Matriz final de decisión de las alternativas evaluadas. 106

Tabla 38. Información general de la hoja de ruta para la implementación de una máquina trituradora. 109

Tabla 39. Cronograma estimado para la implementación de la tecnología de trituración. 112

Tabla 40. Principales recursos requeridos para la trituración. 112

Tabla 41. Requerimientos y parámetros para una trituradora de plástico PET. 113

Listado de Figuras

Figura 1. Jerarquía de la gestión de residuos sólidos. 22

Figura 2. Economía circular en relación con diversas perspectivas para el desarrollo sostenible. 29

Figura 3. Ecosistema colombiano para la Estrategia de Economía Circular del PET. 31

Figura 4. Proveedores de las empresas de transformación de plástico en Bogotá. 32

Figura 5. Composición macroscópica de los residuos en Bogotá a 2017. 35

Figura 6. Serie histórica de disposición de residuos sólidos en el periodo 2010 – 2020, para las 8 ciudades con mayor población del país. 36

Figura 7. Porcentaje de recicladores registrados en el RURO por localidad, a julio de 2022. 37

Figura 8. Estrato socioeconómico de la población recicladora de Bogotá, según el género a julio de 2022. 38

Figura 9. Mapa político de Bogotá con sus respectivas localidades. 44

Figura 10. Ubicación y distribución de las organizaciones de recicladores de la localidad de Suba registradas en el RUOR según su número de afiliados. 45

Figura 11. Información extraída de la base de datos para el análisis bibliométrico. 57

Figura 12. Diagrama de flujo de la metodología seguida para el desarrollo del primer objetivo. 58

Figura 13. Proceso de ponderación de criterios para el análisis multicriterio AHP. 60

Figura 14. Proceso para evaluar alternativas por criterio según análisis multicriterio AHP. 61

Figura 15. Cálculo final para obtener la priorización de alternativas según método AHP. 62

Figura 16. Diagrama de flujo de la metodología seguida para el desarrollo del segundo objetivo. 62

Figura 17. Diagrama de flujo de la metodología seguida para el desarrollo del tercer objetivo. 63

Figura 18. Producción científica sobre el tema en los últimos siete años. 64

Figura 19. Producción científica por país sobre el reciclaje de PET. 65

Figura 20. Mapa temático del reciclaje de plástico PET. 66

Figura 21. Fuentes más relevantes sobre el reciclaje de PET. 67

Figura 22. Impacto local de las fuentes: índice H. 68

Figura 23. Afiliaciones más relevantes 69

Figura 24. Autores más relevantes. 69

Figura 25. Impacto local de los autores: índice H. 70

Figura 26. Gráfico de tres campos (relación entre revistas o fuentes, palabras clave y autores). 71

Figura 27. Documentos más citados a nivel mundial. 72

Figura 28. Proceso general del reciclaje de plástico, donde se destaca el reciclaje mecánico. 77

Figura 29. Diagrama de las principales etapas del reciclaje mecánico de plástico, particularmente el PET..... 77

Figura 30. Tecnologías utilizadas para los procesos de transformación según Informe Técnico-Proyecto "Perfilar 200 empresas transformadoras de Plástico posconsumo en Bogotá" de 2019. 78

Figura 31. Compactadoras de rodillos para botellas PET..... 79

Figura 32. Diferentes tipos de compactadoras por prensado: A) prensa manual, B) prensa hidráulica vertical y C) prensa hidráulica horizontal..... 79

Figura 33. Molino de cuchillas rotatorias para trituración de PET..... 80

Figura 34. Algunos tipos de molinos trituradores de plástico. 81

Figura 35. Algunos tipos de cuchillas empleadas en trituradores de plástico. 81

Figura 36. Esquema de una extrusora de husillo sencillo..... 82

Figura 37. Esquema general de una máquina extrusora de plástico. 83

Figura 38. Extrusora de lámina o de dado plano. 84

Figura 39. Pellets resultantes de las diferentes tecnologías de peletizado de plástico..... 85

Figura 40. Principales tipos de peletizadoras: A) peletizadora de filamentos, B) peletizadora de corte bajo agua y C) peletizadora de anillo de agua. 86

Figura 41. Esquema general de una máquina peletizadora de hebras..... 86

Figura 42. Esquema general de una peletizadora de anillo de agua. 87

Figura 43. Esquema general de una peletizadora bajo agua. 88

Figura 44. Diagrama de flujo de procesos del pretratamiento de residuos de plástico PET..... 111

Figura 45. Pieza publicitaria de una convocatoria para que las organizaciones de recicladores de Bogotá puedan acceder al Programa de Incentivos de la UAESP 115

Identificación de tecnologías de bajo costo para la valorización de residuos de plástico PET, en el ámbito del reciclaje de oficio de la localidad de Suba en Bogotá

Identification of low-cost technologies for the treatment of PET plastic waste, in recycling processes in the locality of Suba in Bogotá

Resumen

El presente estudio tuvo como finalidad investigar sobre distintas tecnologías de bajo costo para la transformación de plástico PET posconsumo, que pueden ser implementadas a futuro de manera viable y acorde con su contexto, por organizaciones de recicladores de oficio de la localidad de Suba en Bogotá que trabajan con la ONG ENDA Colombia. Para ello, primero se realizó un análisis bibliométrico para conocer el panorama investigativo global actual sobre el reciclaje de PET. Luego, se realizó una revisión bibliográfica sobre tecnologías para transformar el plástico PET ya consolidadas y con mayor presencia en el mercado, destacándose las tecnologías de reciclaje mecánico. Posteriormente, de estas tecnologías se eligieron cinco para profundizar y mediante un análisis multicriterio, se llevó a cabo una priorización de estas para elegir las más acordes al caso de estudio teniendo en cuenta nueve criterios. Las tecnologías evaluadas fueron: compactadora vertical, trituradora, peletizadora de filamentos, peletizadora de anillo de agua y extrusora de dado plano. Se obtuvo que la compactación es el proceso con mayor viabilidad de implementación porque es económico, accesible, de fácil uso y con menos requerimientos, pero no implica valor agregado a los residuos de PET; la segunda tecnología más adecuada fue la trituración, para la cual se planteó una hoja de ruta para su implementación, dentro de un proceso de pretratamiento de residuos PET. Se destaca la importancia del reciclaje de oficio en la gestión de los residuos y en el desarrollo de la economía circular, permitiendo avanzar hacia la sostenibilidad en la ciudad.

Palabras clave: Aprovechamiento, economía circular, residuos sólidos, plástico.

Abstract

The purpose of this study is to investigate different low-cost technologies for the transformation of post-consumer PET plastic that can be implemented in the future in a viable manner and according to their context, by the organizations of recyclers from the locality of Suba in Bogotá that work with NGO ENDA Colombia. To do this, first, a review of the current panorama of world research on PET recycling was carried out, through a bibliometric analysis. Then, by means of a bibliographic review, the already consolidated PET plastic transformation technologies and with a greater presence in the market were investigated, highlighting the technologies used in mechanical recycling. Five of these technologies were selected and, through a multi-criteria analysis based on the analytical hierarchical process or AHP, they were prioritized to choose the ones considered most appropriate for the case study, considering nine criteria. The technologies evaluated were vertical compactor, shredder, filament pelletizer, water ring pelletizer and flat die extruder. As a result, compaction is the process with the highest feasibility of implementation because it is economical, accessible, easy to use and with fewer requirements, but it does not imply added value to PET waste. The second technology prioritized was shredding, for which a roadmap was proposed for its implementation as a pilot plan, within a PET waste pretreatment process. This project recognizes the importance of the work of waste pickers in waste management and in the development of the circular economy, making it possible to move towards sustainability in the city.

Keywords: waste recovery, circular economy, plastic, solid waste.

1. Introducción

A lo largo de la historia, en América Latina, el manejo de los residuos ha recaído sobre los recuperadores de materiales conocidos también como recicladores de oficio, que cumplen una valiosa labor que beneficia a la sociedad y a los ecosistemas, puesto que, estas personas al separar y recuperar materiales para su reciclaje contribuyen a la reducción de la demanda de materia prima y la prolongación de la vida útil del relleno sanitario. Sin embargo, a nivel social gran parte de esta ha sido afectada por una marginación permanente, muchas veces viéndose obligados a realizar su trabajo en condiciones precarias y riesgosas para percibir pocos ingresos (Núñez Amórtegui, 2016, pág. 17).

Por otro lado, dentro de los residuos de mayor interés se destacan los plásticos por su difícil degradación en el ambiente, lo que los hace un contaminante persistente. Dentro de los plásticos sobresale el tereftalato de polietileno, conocido también como PET por sus siglas en inglés, que se usa principalmente como empaque o envase de alimentos y productos, es decir un plástico de un solo uso, que una vez que llega al consumidor es desechado. Por ejemplo, las botellas PET, que se generan como residuos de actividades industriales y domésticas, se han convertido en una preocupación debido a los altos volúmenes de consumo, la poca recuperación al finalizar su vida útil y su presencia en ecosistemas terrestres y acuáticos, convirtiéndose en fuente contaminante del entorno (Angulo Martínez, 2022).

El país actualmente busca revertir la tendencia del aumento de la extracción de materiales para procesos de fabricación, en este caso de plástico, y cerrar el ciclo de materiales por medio de diversas políticas encaminadas hacia la economía circular; para lo cual el reciclaje es un eslabón fundamental. Esta actividad permite gestionar la mayoría de los residuos plásticos, especialmente el polietilentereftalato o PET, el cual tiene actualmente una demanda superior a las cantidades que recicla el país (Salcedo Reina, 2021), haciéndolo una problemática de preocupación. Por ello el papel de la población recicladora es fundamental, no solo en el marco de la economía circular sino también en la gestión de los residuos, particularmente en Bogotá, donde las problemáticas de residuos sólidos son críticas. Por tal motivo es importante trabajar por la dignificación de esta población y su oficio, visibilizando el papel ambiental tan relevante de estas personas.

Por ello, desde la práctica profesional con la organización ENDA Colombia, que trabaja con población recicladora de oficio de la ciudad de Bogotá, principalmente de la localidad de Suba, surge el presente proyecto, con el que se busca identificar tecnologías para transformar el plástico PET, que sean de bajo costo y se adecuen al contexto socioeconómico del reciclaje en la capital. Esto con el fin de apoyar a estas personas para que conozcan sobre las tecnologías y puedan implementarlas a futuro. En este sentido, el proyecto se sustenta principalmente en una revisión bibliográfica para recopilar la información de interés, de igual forma, también se implementa un análisis multicriterio (AMC) con el fin de clasificar y priorizar las tecnologías que se consideren más acordes a la población objetivo, y se plantea una hoja de ruta para una de estas tecnologías priorizadas, es decir, que haya tenido uno de los mayores puntajes en el AMC.

Lo anterior se puede relacionar en cierta medida con el concepto de *vigilancia tecnológica (VT)*, que es un proceso sistemático y organizado que comprende la búsqueda, recolección y análisis de información, como aspectos legislativos, normativos, sociales, económicos, de mercado, conocimientos científicos y tecnológicos, entre otros, con el fin de identificar cambios y novedades de una organización y su entorno para la toma de decisiones (Sánchez Rico, 2019). Este concepto, surge de la necesidad de las organizaciones de obtener información útil para cumplir sus objetivos y anticiparse a sus

competidores; articulándose con procesos de Inteligencia Competitiva y fortaleciendo la Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i) (Cruz-Rojas, Molina-Blandón, & Valdiri-Vinasco, 2019). Así pues, la presente monografía se relaciona con la VT en la medida en que se recolecta información sobre tecnologías para el reciclaje, que contribuyen a la toma de decisiones de las organizaciones de recicladores, en este caso, pero de manera no focalizada.

La presente monografía está enmarcada dentro del macroproyecto de Género y Cambio Climático para Colombia, desarrollado por ENDA, el cual es una iniciativa que busca fortalecer la participación ciudadana de mujeres en diversos escenarios, enfocada hacia el manejo de residuos, como eje central del ordenamiento territorial. Lo anterior tiene como finalidad la creación de modelos resilientes que consideren las cuestiones de género como parte del plan nacional sobre el clima y la recuperación tras el paso del COVID-19, contribuyendo al fortalecimiento de la política climática nacional y a la recuperación económica sostenible y equitativa del país (ENDA AL- Colombia, 2022).

El documento se divide en cuatro partes. La primera consta de la formulación del proyecto y abarca el planteamiento del problema, la justificación y los objetivos del proyecto. La segunda parte comprende el marco de referencia, es decir, la base teórica y conceptual que sustenta la presente investigación, donde se incluyen el estado del arte, el marco teórico, el marco conceptual, el marco geográfico, el marco legal y normativo y el marco institucional. La tercera parte aborda la metodología e incorpora el enfoque de la investigación, el alcance del proyecto, y los procedimientos, técnicas e instrumentos a emplear para el desarrollo de la monografía, así como también el plan de trabajo. Finalmente, la última parte corresponde al cierre de la investigación y abarca los resultados, el análisis y la discusión, las conclusiones y las recomendaciones.

El propósito de este proyecto no es otro que ahondar en las principales tecnologías para la transformación de materiales, en este caso en particular del plástico PET, pero con un enfoque desde la economía circular y dando particular importancia a las organizaciones de recicladores de Bogotá, más específicamente las de la localidad de Suba, que constituyen un actor fundamental en la gestión integral de los residuos sólidos.

2. Planteamiento del problema

El plástico es un residuo de preocupación a nivel mundial principalmente por su difícil degradación, se estima que cada minuto, se vende un millón de botellas de plástico en todo el mundo, y cada botella tarda unos 450 años en descomponerse o más si no está a la intemperie. Las afectaciones ambientales del plástico inician desde su fabricación, puesto que más del 90% de los plásticos del mundo se producen a partir de combustibles fósiles, generando grandes emisiones de gases de efecto invernadero. De igual manera los residuos de este material afectan diversos ecosistemas, principalmente los acuáticos, unos 8 millones de toneladas de residuos plásticos acaban en los océanos cada año (Miranda, 2022).

Sin embargo, la problemática con este material radica principalmente en su disposición final ya que desde su diseño están concebidos para ser de uso único (es decir, de carácter desechable) y las empresas productoras generalmente no suelen ser las responsables de la vida completa de sus productos (Rivera Botero & Patiño Tejada, 2021, pág. 5). Alrededor del “42% del plástico utilizado en el mundo se destina al empaquetado de alimentos y productos manufacturados” (Miranda, 2022), en otras palabras, constituyen los plásticos de un solo uso, que solo pasan unos breves instantes en las manos de los consumidores. Dentro este tipo de plásticos se destaca el tereftalato de polietileno, conocido también

como PET, el cual es muy usado en envases, principalmente por su durabilidad, maleabilidad, bajo costo y sus características de conservación del líquido contenido, como: bebidas carbonatadas, aguas minerales, aceites, etc. (Rivera Botero & Patiño Tejada, 2021, pág. 5).

Colombia no es la excepción a este problema, se estima que en el país se consumen alrededor de 1.000.000 de toneladas de plástico al año y un 93 % de los plásticos de un solo uso no se recicla, y los restantes sólo pueden ser reciclados un número limitado de veces (Durán González, 2020). Pese a que en el país se han venido implementado diversas estrategias como la responsabilidad extendida del productor el problema aún persiste. El porcentaje de responsabilidad extendida del productor a 2030 en el país es del 30 %, por lo que indica que los productores no están obligados a reciclar más del 70 % de su producción (Durán González, 2020). En el artículo 9 de la resolución 1407 de 2018, se describen las metas cuantitativas que deberán cumplir los productores en cuanto al aprovechamiento de los envases y empaques que son puestos en el mercado por ellos, para el año 2021 la meta era de un 10%, y cada año aumenta entre un 2% y 3%, hasta llegar al 30% de aprovechamiento de estos materiales.

A nivel nacional, la industria del plástico, y en especial la de los plásticos de un solo uso como el PET, se abordó en la Estrategia Nacional de Economía Circular - ENEC, una hoja de ruta que hacía parte del Plan Nacional de Desarrollo del anterior gobierno para el periodo 2018 – 2022, desarrollada principalmente por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, junto con el Ministerio de Comercio, Industria y Turismo y el Departamento de Planeación Nacional (Gobierno de la República de Colombia, 2019). Con este tipo de políticas se busca que los residuos se reintegren a la cadena productiva con el fin de "optimizar la eficiencia en la producción y consumo de materiales, reducir la huella hídrica y de carbono, valorizar continuamente los recursos y cerrar ciclos" (Salamanca Galvis, 2021).

Si bien la ENEC era una estrategia del gobierno anterior y por el momento ya no está vigente, las corrientes priorizadas siguen siendo importantes y esta política se mantiene como un referente importante en cuanto los procesos de transición de una economía lineal a una circular en Colombia, promovida desde el gobierno nacional. Actualmente se está ajustando la política de producción y consumo sostenible y también la de gestión ambiental urbana, que contarán con un fuerte enfoque hacia la economía circular.

Sin embargo, el escenario colombiano de la economía circular para PET se caracteriza particularmente por su complejidad en cuanto a los diversos intercambios dentro de la cadena logística de envases PET (reciclaje – depósito – transformador – productor – distribución – consumo – reutilización), dificultades que inician desde la falta de cultura de separación en la fuente que existe en la población en general, y que constituye el punto de partida para el aprovechamiento de los residuos plásticos y la aplicación adecuada de economía circular (Zapata Bravo, Vieira Escobar, Zapata-Domínguez, & Rodríguez-Ramírez, 2021) por lo que esta labor es asumida por los recicladores, actores fundamentales de este modelo económico quienes recuperan estos materiales, cerrando el círculo de la economía circular.

De acuerdo con Larue, De Lassus, & Moguel y Anza (2017) en América Latina, cerca del 90% de los materiales que son reciclados para uso industrial es recuperado por recolectores informales; los residuos constituyen el medio de sustento para parte de la población más vulnerable en el continente, lo que corresponde a más o menos unos 4 millones de persones que se dedican a la recuperación, separación y comercialización informal de materiales reciclables, como su principal fuente de ingresos.

La labor de los recicladores de oficio también contribuye a aliviar la presión que soportan los rellenos sanitarios, que reciben aproximadamente el 83% de los residuos sólidos domiciliarios que se generan en

Colombia, de acuerdo con el documento CONPES 3874 que también señala que el 38% de estos rellenos cuentan con una vida útil menor a tres años y cada vez es más difícil adquirir predios para nuevos sitios de disposición. Es por ello, que es necesario que existan más "incentivos económicos, normativos y regulatorios para minimizar la generación de residuos sólidos y aumentar los niveles de aprovechamiento y tratamiento de los mismos" (DNP, 2016).

Así pues, para promover el aprovechamiento de los residuos sólidos, y particularmente de los plásticos, en 2021 se publica el Plan Nacional Para la Gestión Sostenible de Plásticos de Un Solo Uso, un documento que plantea metas relacionadas con: reciclaje, sustitución de materiales, ecodiseño, reincorporación de materiales al ciclo productivo, instrumentos de gestión y otras medidas encaminadas a prevenir los impactos negativos de estos residuos, desde el cierre de ciclos y la economía circular. Una de las metas de este plan es que, a 2030, el 100% de los plásticos de un solo uso puestos en el mercado, sean de carácter reutilizable o reciclable o compostable, o que cuenten con un contenido mínimo del 30% de material reciclado (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021).

Para contribuir al cumplimiento de dicho plan, en julio de 2022 se aprobó la Ley 2232, en la que se prohíbe y se reglamenta la sustitución gradual de 14 productos plásticos de un solo uso, que en su mayoría corresponden a bolsas, desechables, envases y empaques para domicilios. Para el caso de las botellas PET, si bien no se prohíben en esta ley, se plantean metas en el marco de la responsabilidad extendida del productor, donde al año 2025, las botellas PET de agua potable deberán fabricarse con mínimo 50% de material reciclado, porcentaje que incrementará al 90% para el año 2030; y para las botellas que contengan otro tipo de bebidas, estas deberán ser fabricadas con un 20% de material reciclado al año 2025, incrementando a un 35% para 2030, al 40% para 2035 y al 60% para el año 2040 (Ley 2232, 2022).

En Colombia, la actividad del reciclaje aparece desde finales de los años 80, y era ejercida principalmente por personas buscaban refugiarse en grandes ciudades debido al desplazamiento generado por la violencia en zonas rurales (Alcaldía Mayor de Bogotá & UAESP, 2022). Así mismo, en Bogotá, gran parte de las personas que ejercen este oficio provienen de las zonas periféricas de Cundinamarca o de zonas rurales de la capital. De acuerdo con la Alcaldía Mayor de Bogotá y la UAESP (2022), la población recicladora de la ciudad en general se encuentra en condiciones socioeconómicas muy difíciles puesto que más de la mitad de estas personas se encuentran entre los estratos 1 y 2: al menos el 1 % de los recicladores son estrato 0, alrededor del 29 % son estrato 1 y un 24 % son de estrato 2, por lo que muchos presentan condiciones de vulnerabilidad económica y social.

Una manera entonces, que tienen los recicladores de mejorar su calidad de vida a través de este oficio es mejorando sus procesos y realizando transformaciones a los materiales recolectados, como el PET, de manera que se incrementa el valor de estos, y pueden venderlos a un mayor precio, obteniendo más rentabilidad y dinero. Sin embargo, es difícil la accesibilidad a tecnologías para el tratamiento y transformación de residuos plásticos, principalmente porque se requiere de inversión económica y los proyectos innovadores a menudo se quedan en proyectos a pequeña escala; estas tecnologías pueden llegar a ser costosas para esta población, por lo que en ocasiones se requiere financiación externa para su implementación. Organizaciones no gubernamentales como ENDA han llevado a cabo proyectos con algunas organizaciones de recicladores para la transformación de materiales como compostaje o plantas de aglutinado para la transformación de plásticos, sin embargo, estos proyectos no suelen ser sostenibles en el tiempo por los costos económicos.

Por ello, desde ENDA Colombia surge la necesidad de contar con información clara y de fácil acceso sobre las principales tecnologías existentes para llevar a cabo procesos de transformación o valorización

de materiales reciclables recolectados por población recicladora, en este caso el tereftalato de polietileno o PET, que sea acorde con su contexto y pueda contribuir a la toma de decisiones sobre su implementación a futuro. Por ello, se plantea el problema central como el ***desconocimiento de tecnologías de bajo costo para la transformación de plástico PET, que se adecuen a las condiciones del reciclaje en Suba, Bogotá*** (ver ***¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.¡Error! No se en cuentra el origen de la referencia.***).

Las principales causas de este problema son las dificultades en los procesos de reciclaje que se generan por la falta de cultura sobre la gestión de los residuos de la población en general, la falta de herramientas para reinsertar los residuos plásticos a la cadena productiva de manera óptima, puesto que aún el país debe fortalecer las estrategias de implementación de la economía circular, y finalmente las pocas investigaciones innovadoras que hay en el país sobre el reciclaje del plástico, porque hay un desconocimiento de la población en general sobre el manejo del plástico y sus residuos en Colombia. Dentro de las principales consecuencias de ello es que no hay acceso a información sobre el reciclaje de plástico, así mismo, no se contribuye a continuar optimizando los procesos de reciclaje de este material, y no se logra de manera satisfactoria la implementación de un modelo de economía circular. Todo ello hace que no se incentive la implementación de estrategias para la valorización de plástico PET y, por ende, no se aprovechen completamente los beneficios económicos de su comercialización y reciclaje.

De acuerdo con FUNDES, una consultora pionera experta en el desarrollo de micro, pequeñas y medianas empresas (Mipymes) y su integración en la cadena de valor, en su documento *Cómo lograr un reciclaje confiable, eficiente y sustentable a través de la economía circular en América Latina*, existen varios desafíos en la cadena del reciclaje, que son comunes en todo el continente, dentro de los que se encuentran la informalidad, la baja capacidad logística, políticas poco amigables y la desconfianza existente entre los distintos actores del reciclaje como los recicladores de oficio, bodegas y centros de acopio, y fuerza de compras de empresas manufactureras. Un elemento que afecta la confiabilidad de la cadena del reciclaje es el bajo nivel de tecnificación, en cuanto a instalaciones y equipamientos, con el que cuentan los recicladores de base y los centros de acopio, que a menudo trabajan con equipamientos básicos y obsoletos, “lo que afecta su productividad, su capacidad logística, y la eficiencia de la cadena de suministro” (Larue, De Lassus, & Moguel y Anza, 2017).

ENDA Colombia se enfoca en proyectos sociales y formativos, donde se relacionan los problemas ambientales con el tema de derechos humanos. Por lo que con el presente proyecto se busca dar un aporte investigativo a la organización y otorgar una herramienta informativa para que las personas que se dedican al reciclaje puedan conocer, al menos de manera general, cuáles de estas tecnologías pueden ser más factibles de financiar y/o implementar, y que a futuro puedan mejorar su labor del reciclaje, así como su calidad de vida.

2.1 Pregunta de investigación

¿Cuáles son las principales tecnologías de bajo costo para la transformación o valorización del plástico PET que pueden llegar a ser fácilmente financiables e implementadas por organizaciones de recicladores de la localidad de Suba en Bogotá, de acuerdo con su contexto socioeconómico?

3. Justificación

El presente proyecto se realiza dentro del marco de práctica profesional con ENDA Colombia, la cual es una organización no gubernamental que se encuentra desde hace casi cuatro décadas en Bogotá, y trabaja apoyando a la ciudadanía y a las comunidades en tres dimensiones: sostenibilidad, medio ambiente y perspectiva de género. Dentro de las poblaciones con las que esta ONG desarrolla sus actividades, se encuentra la población recicladora, con la cual ENDA ha llevado a cabo acciones como apoyar y propiciar la conformación de organizaciones de recicladores y la ejecución de procesos de formación, buscando la dignificación del oficio del reciclaje popular. Es por ello, que el presente proyecto surge como una manera de apoyar, en cuanto a información a la población de recicladores, principalmente los que se encuentran en la localidad de Suba, y con los cuales ENDA ha venido trabajando recientemente.

Para ello, busca ser una línea base con información concisa y general que pueda contribuir a asesorar a las asociaciones de recicladores de oficio, en cuanto a los procesos de transformación y valorización de materiales reciclables, como el plástico PET, las principales tecnologías que existen para ello y las implicaciones de su implementación. Destacando la importancia de que las personas que se dedican al reciclaje de oficio estén organizadas de acuerdo con el decreto 596 para que puedan gestionar recursos y actuar de manera más organizada y articulada. De igual forma, también se busca visualizar de manera general el panorama investigativo existente sobre este tema, contribuyendo a que se cuente con información acerca de cómo se han dado los avances científicos en el país y el mundo, que pueden llegar a contribuir a la mejora de los procesos de reciclaje en la ciudad.

La finalidad es contribuir a que la población recicladora pueda contar con esta información al momento de tomar decisiones respecto a la aplicación de estas tecnologías como una forma de mejorar su trabajo, aumentando el valor agregado de los materiales recolectados y de esta forma, puedan tener un mayor beneficio al momento de venderlos, mejorando su calidad de vida. Para la organización ENDA Colombia, la investigación es un pilar importante para trabajar por la dignificación de los recicladores y su oficio, visibilizando el papel ambiental de estas personas.

Desde el aspecto ingenieril, con este proyecto se busca explorar tecnologías que contribuyan el mejoramiento de la labor y la calidad de vida de estas comunidades, de manera que se aborde el problema de la gestión de los residuos sólidos en Bogotá de una manera integral, teniendo muy presentes las dimensiones sociales, económicas y ecológicas de la zona de estudio. Por ello, uno de los principales aspectos a resaltar del presente proyecto es el uso de software y herramientas de análisis de información para dar un vistazo general al escenario actual de la investigación sobre el reciclaje, así como el uso de herramientas como el análisis multicriterio para la toma de decisiones.

3.1 Pertinencia

La ingeniería ambiental tiene como objetivo principal garantizar la sostenibilidad del desarrollo social y del uso de los recursos agua, tierra y aire, para ello se realiza gestión de estos recursos de manera que se prevenga y/o minimice la contaminación y degradación ambiental. Dentro de los principales problemas que aborda la ingeniería ambiental, se encuentra la contaminación, para lo cual, se trabaja en el desarrollo de soluciones técnicas necesarias para resolver, atenuar o controlar los impactos ambientales de manera acorde con los lineamientos y necesidades legislativas, económicas, sociales y políticas (McGill University, 2022). El énfasis de acción del ingeniero ambiental se enmarca en los principios de

la gestión ambiental; mediante el desarrollo de políticas, estrategias, planes, programas y proyectos, encaminados hacia la sostenibilidad, la conservación y el manejo responsable de los recursos naturales contribuyendo también a mejorar la calidad de vida de las generaciones presente y futura (Universidad El Bosque, 2022).

Teniendo en cuenta lo anterior, el presente proyecto busca abordar la problemática de los residuos plásticos como PET, dando a conocer las alternativas más económicas y de fácil implementación para transformar este material, dirigido hacia poblaciones como lo son los recicladores de la localidad de Suba. Desarrollado y enfocado como una contribución hacia el reciclaje inclusivo, el proyecto se encuentra dentro del marco de la economía circular, la cual es una alternativa orientada al cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS). En este sentido, el proyecto contribuye o responde principalmente a cuatro de estos objetivos:

- ***8. Trabajo decente y crecimiento económico:*** los recicladores pueden tomar decisiones sobre la implementación de tecnologías para transformar materiales como plástico, que puedan ser accesibles y contribuyan a optimizar sus procesos de reciclaje; incrementando la calidad y el valor añadido de los materiales, de manera que puedan obtener más beneficios económicos de su comercialización, lo que a futuro puede mejorar su calidad de vida.

- ***9. Industria, innovación e infraestructura:*** el proyecto ahonda en las innovaciones existentes en cuanto a tecnologías de transformación de residuos plásticos, así mismo se destaca la importancia de la industria del reciclaje en la economía circular, ayudando a cerrar ciclos productivos.

- ***11. Ciudades y comunidades sostenibles:*** se aborda la economía circular como camino hacia la sostenibilidad, desde la gestión de residuos en la ciudad de Bogotá.

- ***12. Producción y consumo responsables***: se resalta la importancia del reciclaje del plástico en el uso sostenible de los recursos. Donde los residuos recuperados se pueden emplear como materia prima para la fabricación de productos, reduciendo la necesidad de extraer recursos de la naturaleza y dándole una nueva vida útil a los materiales.

De igual manera el enfoque hacia el mejoramiento de los procesos del reciclaje y el tratamiento de residuos plásticos se puede alinear con otros ODS como:

- 6. Agua y Saneamiento
- 13. Acción por el clima
- 14. Vida submarina
- 15. Vida de ecosistemas terrestres

3.2 Impacto

El presente proyecto busca impactar a diversos actores en torno al reciclaje en la medida de que busca analizar y organizar información, presentándola de manera que esta pueda ser una herramienta de consulta y toma de decisiones sobre la implementación de tecnologías para la transformación y valorización de materiales por parte de recicladores. Así mismo, busca aportar en diversos aspectos:

- *Sociales:* se plantean las tecnologías de transformación de materiales (el PET en este caso) como una alternativa para que los recicladores optimicen su labor, desde su contexto socioeconómico, mejoren sus ingresos y con ello, su calidad de vida.

- *Económicos:* se destaca el reciclaje como eslabón fundamental para el desarrollo sostenible desde la economía circular reteniendo valor en los materiales.

- *Ecológicos*: se busca mostrar el reciclaje como una labor clave en la gestión de los residuos como el plástico de manera que se reduzcan sus impactos en los ecosistemas.

- *Académicos:* este trabajo puede contribuir a la comunidad académica, en la medida de que se proporciona una revisión al estado actual del campo de investigación sobre el reciclaje por lo que puede ser un punto de partida para estudios futuros más específicos sobre el tema que puedan contribuir a proyectos que posteriormente sean financiados e implementados y que mejoren la calidad de vida de estas comunidades.

- *Políticos:* se da un enfoque desde la normativa y la política relacionada con economía circular, plásticos de un solo uso, posconsumo de envases y empaques, crecimiento verde y, producción y consumo sostenible.

- *Institucionales*: la presente monografía se desarrolla con el fin de contribuir al trabajo que la organización ENDA ha venido adelantando con la comunidad recicladora de Bogotá durante los últimos años.

4. Objetivos

4.1 Objetivo general

Identificar distintas tecnologías de bajo costo para la transformación de plástico PET orientadas hacia la optimización de los procesos del reciclaje de oficio, de la localidad de Suba en Bogotá, apoyados por ENDA Colombia.

4.2 Objetivos específicos

1. Analizar el panorama investigativo actual, tanto global como local, sobre las tecnologías existentes para la transformación y reciclaje de plástico PET.

2. Priorizar las tecnologías más acordes al contexto del reciclaje en Suba para la transformación del plástico PET, mediante un análisis multicriterio.

3. Plantear una hoja de ruta para la implementación de un proyecto piloto para una de las tecnologías priorizadas.

5. Marco de referencia

5.1 Estado del arte

A continuación, se presentan algunas investigaciones que se han realizado respecto a las tecnologías de transformación o valorización de materiales inorgánicos, principalmente plásticos, en el contexto del reciclaje, donde se exploran trabajos realizados tanto a nivel nacional como internacional.

En primer lugar, se presenta el trabajo de grado titulado *Diseño de un modelo piloto para el reciclaje de PET (Polietilentereftalato) en la localidad de Suba (Bogotá D.C.)*, realizado por David Alejandro Echajaya Murcia y Laura Alejandra Orjuela Sarmiento, y presentado en 2021 a la Universidad El Rosario. En este trabajo, se tenía como objetivo el diseño de una propuesta piloto para la recuperación de plástico PET aprovechable, enfocado en la recolección de dicho material, que fuese viable a nivel logístico y financiero, y que contara con un enfoque social y ambiental (Echajaya Murcia & Orjuela Sarmiento, 2021). Para ello, se fundamentó la propuesta con información obtenida mediante revisión bibliográfica y se hizo el análisis de viabilidad.

Para llevar a cabo el diseño, los autores realizaron primero una revisión de fuentes documentales, como artículos, capítulos de libros, documentales y noticias a nivel global, con una temporalidad no mayor a 10 años. Luego, se analizaron informes empresariales y gubernamentales en Colombia, con el fin de conocer cómo se ha realizado el manejo y gestión de los residuos de PET en Bogotá y en Suba. Posteriormente se realizaron entrevistas a diferentes empresas y actores vinculados al sector del plástico reciclado. A partir de ello, se realizó un estudio observacional de la localidad, para identificar la existencia y cantidad de puntos de recolección de residuos plásticos y su efectividad. Teniendo toda esta información, se analizaron los aspectos esenciales del modelo de recolección del Pea conjuntos residenciales (Echajaya Murcia & Orjuela Sarmiento, 2021).

En este estudio, finalmente se concluyó que el modelo planteado fue viable por factores como: la rentabilidad y fácil manejo del material, la demanda existente de PET, una creciente tendencia de consumo responsable, y la oferta amplia de residuos por lo que la competencia no es una preocupación (Echajaya Murcia & Orjuela Sarmiento, 2021). Así mismo, los autores destacan que, en el país, el reciclador de oficio es un actor fundamental para el desarrollo óptimo de estas iniciativas, puesto que su labor y experiencia contribuye a la cobertura de la recolección de este tipo de materiales, reduciendo las limitaciones de los sistemas de recolección centralizados, incrementando su eficiencia logística.

Luego se muestra el artículo *Alternativas para fortalecer la valorización de materiales reciclables en plantas de manejo de residuos sólidos en pequeños municipios*, de Fanor Alirio Victoria Calambas, Luís Fernando Marmolejo Rebellón y Patricia Torres Lozada, y publicado en 2012 en la Revista Ciencia e ingeniería neogranadina. Aquí se exploró el tema de las plantas de manejo de residuos sólidos (PMRS), que se emplean en la gestión de residuos sólidos municipales en pequeñas localidades, pero que no tienen mucha rentabilidad. Por ello los autores "proponen opciones para fortalecer la valorización de la fracción reciclable de los residuos sólidos municipales (RSM), tomando como referencia tres poblaciones del Valle del Cauca" (Victoria Calambas, Marmolejo Rebellón, & Torres Lozada, 2012).

Para el desarrollo de la investigación, en primer lugar, se definió el área de estudio, la población, la actividad económica principal y el prestador del servicio de aseo. Luego, se hizo la recopilación de información en cuatro etapas: se hizo la estimación de las cantidades y composición de los residuos sólidos municipales, después un diagnóstico del aprovechamiento de materiales reciclables en las PMRS,

un reconocimiento del mercado regional de materiales reciclables y finalmente la formulación de alternativas para fortalecer la valorización de los materiales reciclables en las PMRS (Victoria Calambas, Marmolejo Rebellón, & Torres Lozada, 2012).

El estudio concluye afirmando que existen residuos reciclables que tienen potencial para ser mercadeados en la región. Sin embargo, esto se dificulta por factores como la poca separación en la fuente e inadecuados procesos de clasificación y acondicionamiento, que afectan la calidad de los materiales y su comercialización, así como también incrementan los requerimientos de espacio y logística para la disposición final de residuos (Victoria Calambas, Marmolejo Rebellón, & Torres Lozada, 2012). Los autores señalan que estos requerimientos y los costos de almacenamiento, transporte y demás se pueden reducir mediante el empleo de procesos de acondicionamiento *in situ* como la trituración de materiales y de transformación de dichos materiales, como el aglutinado, incrementando también las posibilidades de comercialización, contribuyendo a la sostenibilidad financiera.

A nivel internacional se relaciona el estudio titulado *Análisis y diseño de una planta de reciclaje de residuos sólidos inorgánicos en la ciudad de Moyobamba, 2018*, cuyo autor es Cleider Arturo Castro Córdova y que fue presentado en 2019 como tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Sanitario a la Universidad Nacional de San Martín–Tarapoto de Perú. El estudio abordó la problemática ambiental de la disposición de residuos sólidos valorizados en el botadero municipal de Moyobamba, y por medio de la propuesta se buscó generar conciencia en el tema de reciclaje (Castro Córdova, 2019). La planta de reciclaje fue diseñada con la finalidad de reducir los residuos sólidos valorizados dispuestos en el botadero municipal, generando ganancias económicas, y mejorando el manejo y la gestión de los residuos. La viabilidad del proyecto se verificó mediante un estudio financiero y se determinaron los requerimientos necesarios para la puesta en marcha de la planta. Se concluyó que la planta diseñada fue factible técnica, financiera, económica, social y ambientalmente (Castro Córdova, 2019).

Se tiene en cuenta también el artículo de Sonil Nanda y Franco Berruti, titulado *A technical review of bioenergy and resource recovery from municipal solid waste*, y publicado por la revista Journal of Hazardous Materials en 2021. En esta investigación se aborda la problemática del incremento alarmante de la generación de residuos sólidos municipales, provocado por el crecimiento demográfico, la rápida urbanización, la industrialización y el desarrollo económico; señalando que estos residuos sólidos municipales pueden ser un recurso económicamente viable para la producción de combustibles verdes a través de diferentes rutas de conversión de residuos en energía (Nanda & Berruti, 2021).

El artículo es entonces una revisión de diferentes tecnologías de conversión de residuos en energía, como la conversión termoquímica y biológica para la valorización de los residuos sólidos urbanos y la desviación para el reciclaje. Algunas de las tecnologías presentadas incluyen la incineración térmica convencional, la incineración hidrotermal moderna, y tratamientos termoquímicos (pirólisis, licuefacción y gasificación) y biológicos (digestión anaerobia y compostaje) para la transformación de residuos sólidos en productos biocombustibles (Nanda & Berruti, 2021). Los autores manifiestan también la importancia de la discusión de los méritos y desafíos técnicos de las tecnologías de conversión de residuos en energía, con el fin de promover el desvío de residuos sólidos de los vertederos a las biorrefinerías (Nanda & Berruti, 2021):

Finalmente, se considera el estudio publicado en la revista Journal of Marketing en 2019, llamado *Knowing What It Makes: How Product Transformation Salience Increases Recycling*, escrito por Karen Page Winterich, Gergana Y. Nenkov, y Gabriel E. Gonzales. En esta investigación se aborda el tema de cómo los consumidores ven el reciclaje, es decir, si se piensa en el destino final de los materiales

reciclables. Los autores proponen que la transformación de los materiales y la difusión de información sobre este tema aumenta el reciclaje; el que las personas sepan que los materiales reciclables se convierten en nuevos les motiva a reciclar. Por ello, este estudio resalta la importancia de la difusión de información y el marketing dirigido a consumidores y generadores de residuos, sobre todo en el diseño de las campañas de reciclaje y el posicionamiento de los productos reciclados en el mercado, para el incremento del reciclaje y los comportamientos sostenibles (Winterich, Nenkov, & Gonzales, 2019).

Tal y como lo demuestran los estudios anteriormente presentados, se evidencia que actualmente hay estudios concluyentes acerca del aprovechamiento de PET, puesto que, por las características de este material, puede ser fácilmente transformado y reintroducido al ciclo productivo. Sin embargo, los principales retos para el reciclaje del PET se encuentran direccionados hacia la separación, la recolección y la gestión de este. Considerando estos estudios, la presente monografía busca contribuir con una metodología para la priorización de tecnologías de reciclaje, que sean de bajo costo y que se adecuen a las características socioeconómicas de los recicladores de oficio, quienes son claves en los procesos de valorización de materiales como el PET.

5.2 Marco conceptual

A continuación, se presentan algunos conceptos importantes a considerar para el desarrollo del presente proyecto:

- ***Basura***

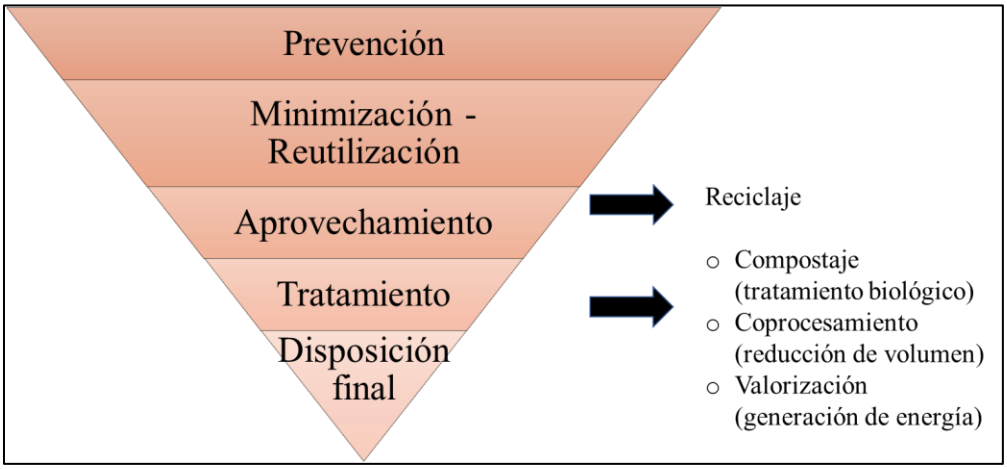
En términos generales, la palabra basura alude a aquello que provoca suciedad o a los desperdicios y los residuos (Pérez Porto & Gardey, 2017). Por otro lado, la basura suele emplearse como sinónimo de *residuo* haciendo referencia al material que pierde utilidad tras haber cumplido con su misión o servido para realizar un determinado trabajo, más específicamente a los desechos que el hombre ha producido (Responsabilidad Social Empresarial (RSE), 2022).

Sin embargo, diversos autores y organizaciones consideran que debería hacerse una diferencia entre residuo y basura, de manera que los desechos, artículos y demás objetos que se tiran porque ya no son útiles sólo deberían considerarse basura si no pueden ser reciclados (Busch Systems, 2022). En la naturaleza los desechos (como, oxígeno, dióxido de carbono y materia orgánica muerta) se utilizan como alimento o reactivo reintegrándose de nuevo dentro del ecosistema, mientras que los materiales de desecho resultantes de las actividades humanas suelen ser muy resistentes y tardan mucho tiempo en descomponerse, por lo que el concepto de basura suele aplicarse a los resultantes de la actividad humana (INTOSAI, 2022). Actualmente, con el fin de promover la circularidad y las nuevas oportunidades de negocio a partir del reciclaje para darle una segunda vida a productos, se prefiere hablar de residuos y no de basura (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022).

- ***Gestión integral de residuos sólidos (GIRS)***

De acuerdo con el documento CONPES 3874 de 2016, que contiene la Política Nacional Para la Gestión Integral de Residuos Sólidos, la gestión integral de los residuos abarca las etapas de: generación, separación en la fuente, recolección, transferencia y transporte, aprovechamiento, tratamiento y su disposición final. El Para ello existe un orden de preferencia de medidas encaminadas a reducir y gestionar los residuos, lo que se conoce como jerarquía de la gestión de residuos y se presenta en la siguiente figura:

Figura 1. *Jerarquía de la gestión de residuos sólidos.*



Fuente: Tomado de documento CONPES 3874, 2016.

Tal y como se aprecia en la figura anterior, la jerarquía se presenta como una pirámide invertida en la cual se establecen por prioridad las medidas para el manejo de los residuos, encontrándose en la parte superior las medidas de mayor preeminencia. En el CONPES 2874 los conceptos asociados a la GIRS se describen de la siguiente manera:

1. *Prevención:* lo primero es tomar medidas para prevenir que se generen residuos. Este es el propósito primordial de la gestión integral, encaminada hacia la economía circular.

2. *Minimización:* la siguiente medida por orden de prioridad consiste en reducir los residuos sólidos, por ejemplo, a través de la reutilización.

3. *Aprovechamiento:* entendido también como reciclaje.

4. *Tratamiento de residuos no aprovechables:* que involucra tres procesos principales: 1) la reincorporación de materiales biodegradables a procesos productivos, por ejemplo, mediante el compostaje o la digestión anaeróbica; 2) la valorización energética, y 3) la reducción del volumen o tamaño de los residuos antes de su disposición final.

5. *Disposición final*: los residuos se disponen en rellenos sanitarios o se incineran sin valorización energética. Es la última medida para los residuos sólidos que no se han podido evitar, desviar o recuperar en pasos anteriores.

- ***Economía Circular***

Es un concepto económico que se interrelaciona con la sostenibilidad. El objetivo de este sistema es mantener el valor económico de los productos, los materiales y los recursos durante el mayor tiempo posible, reduciendo también la generación de residuos (Fundación para la Economía Circular, 2017). Esta economía tiene un enfoque centrado en los sistemas, por ende, involucra procesos industriales y actividades económicas que sean restaurativos o regenerativos, mediante el diseño superior de materiales, productos y sistemas (como los modelos de negocio) (EPA, 2022). De esta manera, se cambia el modelo en el que los recursos se extraen, se convierten en productos y luego se convierten en desechos a un modelo basado en el principio de “cerrar el ciclo de vida” de los productos, los servicios, los residuos,

los materiales, el agua y la energía (Fundación para la Economía Circular, 2017). De acuerdo con Ellen MacArthur Foundation (2022) la economía circular se basa en tres principios fundamentales:

1. *Eliminar residuos y contaminación desde el diseño:* los productos deben ser sostenibles desde su concepción, y deben ser pensados considerando todo su ciclo de vida.

2. *Mantener productos y materiales en uso:* alargar la vida útil de los materiales y productos considerando las Rs como la recuperación y el reciclaje.

3. *Regenerar sistemas naturales:* reducir la necesidad de obtener materias primas de la naturaleza, permitiendo la resiliencia de los ecosistemas.

Dentro de la economía circular también existen otros conceptos base que se definen en 9R u oportunidades de retención de valor (ORV): Repensar, Reutilizar, Reparar, Restaurar, Remanufacturar, Reducir, Re-proponer, Reciclar y Recuperar (Reike, Vermeulen, & Witjes, 2018).

- ***Plástico PET***

El *plástico* se define en la ley 2232 de 2022 como un polímero sintético fabricado por el ser humano y que está "dotado de plasticidad en, al menos, alguna fase de su proceso de fabricación y que incluye aditivos químicos en su composición, los cuales son agregados para brindar características particulares al material" (Ley No. 2232 de 2022, Artículo 2). Existen diferentes tipos de plásticos, y estos se clasifican de acuerdo con su fabricación, sus usos y sus características; los siete tipos de plástico se presentan en la *Tabla 1*, a continuación:

Tabla 1. *Clasificación de los plásticos.*

Tipo	Nombre	Características
1 PET	Tereftalato de polietileno	Se produce por policondensación. Existen dos tipos: grado textil y botella. Se caracteriza por ser generalmente de color transparente, impermeable, no tóxico e inerte con el contenido.
2 PEAD	Polietileno de alta densidad	Es un termoplástico fabricado a partir del etileno. Es muy versátil y se puede transformar por inyección, soplado, extrusión o rotomoldeo.
3 PVC	Policloruro de vinilo	Se compone en un 43% de gas y 57% de sal común. Es versátil y se pueden obtener tanto productos rígidos como totalmente flexibles.
4 PEBD	Polietileno de baja densidad	Se produce a partir del gas natural. Por su transparencia, flexibilidad y economía se suele emplear en diversos envases y variadas aplicaciones.
5 PP	Polipropileno	Es un termoplástico que se obtiene por polimerización del propileno. Es rígido, de alta cristalinidad y elevado punto de fusión, con excelente resistencia química.
6 PS	Poliestireno	Es un polímero de estireno monómero. Existen dos clases: 1) *PS Cristal*: es derivado del petróleo, cristalino y de alto brillo y 2) *PS Alto Impacto*: tiene oclusiones de polibutadieno que le confiere alta resistencia.
7 OTROS	Otros plásticos	Incluyen plásticos que no están dentro de las clasificaciones anteriores. Se encuentran plásticos como: policarbonato (PC), poliamida (PA), ABS, SAN, EVA, poliuretano (PU), acrílico (PMMMA) entre otros.

Fuente: Adaptado de Cámara Argentina de la Industria Plástica, 2022.

De acuerdo con la Asociación Colombiana de Industrias Plásticas, Acoplásticos, el tereftalato de polietileno o polietilentereftalato, más conocido como PET por sus siglas en inglés, es un polímero plástico obtenido a partir de un proceso de polimerización de ácido tereftálico y mono etilenglicol. El PET es un "polímero lineal, con un alto grado de cristalinidad y termoplástico en su comportamiento, lo cual lo hace apto para ser transformado mediante procesos de extrusión, inyección, inyección-soplado y termoformado" (Acoplásticos, s.f.). Algunas de sus características son:

- Es totalmente reciclable
- Es cristalino y transparente, pero también admite colorantes
- Tiene una alta resistencia al desgaste y soporta a esfuerzos permanentes
- Tiene buena resistencia química, siendo una buena barrera al CO_2, al O_2 y la humedad, por lo que se emplea a menudo en envases y empaques.
- Está aprobado para su uso en productos que deban estar en contacto con productos alimentarios.

Debido a sus propiedades físicas y su capacidad para cumplir diversas especificaciones técnicas, el PET ha alcanzado un desarrollo relevante en la producción de fibras textiles y diversos envases, así como también en botellas, bandejas, flejes y láminas (Acoplásticos, s.f.).

- ***PGIRS***

El Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos es un instrumento de planeación municipal o regional que contiene objetivos, metas, programas, proyectos, actividades y recursos definidos por uno o más entes territoriales. Este tiene como fin orientar el manejo de los residuos sólidos, con un enfoque fundamental en la política de *gestión integral* de los mismos (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2022). De acuerdo con el Decreto 1077 de 2015, este se ejecuta durante un período determinado, de acuerdo con: un diagnóstico inicial, una proyección hacia el futuro y a un plan financiero viable, de forma que se garantice el mejoramiento continuo del manejo de residuos sólidos y la prestación del servicio de aseo a nivel municipal o regional, evaluado a través de la medición permanente de resultados. (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2022).

- ***PMIRS***

El Plan de Manejo Integral de Residuos Sólidos es un documento guía, que plantea estrategias para el manejo integral de los residuos sólidos aprovechables, peligrosos, orgánicos y ordinarios (Ecorecyclar, 2022). Este se define a partir de un diagnóstico inicial, en el que se evalúa la gestión de los residuos sólidos, así como también: los mecanismos de reducción, reutilización, tratamiento y disposición final, mecanismos de evaluación, de valoración económica de los residuos y la identificación de recursos necesarios para llevarlo a cabo.

- ***Reciclaje***

De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, EPA (Environmental Protection Agency), el reciclaje se define como el proceso de recolectar y procesar materiales para convertirlos en nuevos productos, y que de otro modo serían desechados como basura (EPA, 2021). La EPA también señala que dentro de los beneficios que trae el reciclar a la comunidad y al ambiente están:

la reducción de la cantidad de residuos enviados a vertederos e incineradores, el aumento de la seguridad económica al aprovechar una fuente nacional de materiales, la prevención de contaminación al reducir la necesidad de recolectar nuevas materias primas, el ahorro de energía y la creación de puestos de trabajo en las industrias de reciclaje.

Con el fin de incentivar la reutilización para el cuidado del ambiente, la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (Unesco) desde 2005 impulsó la iniciativa de la celebración del Día Mundial del Reciclaje, el 17 de mayo (Secretaría Distrital de Ambiente, 2022).

- ***Residuos solidos***

El Decreto 4741 de 2005 señala que un residuo sólido o desecho es cualquier objeto, material, sustancia, elemento o producto en estado sólido o semisólido, o contenido en recipientes o depósitos, que es descartado, rechazado o entregado por el generador, debido a que este no puede usarlo nuevamente en la actividad que lo generó o porque la normatividad así lo estipula (SIAC, 2022).

En el contexto de la prestación del servicio público de aseo, el decreto 2981 de 2013, define a los residuos sólidos como cualquier objeto, sustancia o elemento principalmente sólido resultante del consumo o uso de un bien, que el generador presenta para su recolección por parte del prestador del servicio público de aseo. También se considera como residuo sólido lo proveniente del barrido y limpieza de áreas y vías públicas, del corte de césped y la poda de árboles (SIAC, 2022). Los residuos no peligrosos se dividen en aprovechables y no aprovechables.

- ***Tecnologías para el reciclaje de plástico***

Tecnología se define como el conjunto de herramientas o artefactos materiales hechos por el hombre, como los medios eficientes para un fin. Pero también involucra prácticas instrumentales, como la creación, fabricación y uso de medios y máquinas; y el conjunto material y no-material de hechos técnicos (Rammert, 2001). En este caso, se hace referencia a las herramientas, artefactos o prácticas que contribuyen a mejorar el procesamiento de materiales para convertirlos en nuevos productos, en este caso el plástico de tipo PET.

- ***Valorización de residuos***

La valorización de los residuos tiene como fin reincorporar al ciclo productivo materiales ya desechados, de manera que se contribuye al rendimiento de los recursos, se busca también impactar positivamente al ambiente y a la salud pública a la vez que se generan posibilidades de obtener beneficios económicos (Victoria Calambas, Marmolejo Rebellón, & Torres Lozada, 2012). En otras palabras, son operaciones en las que se busca recuperar residuos, darles un valor agregado y reinsertarlos al ciclo productivo.

La valorización de residuos incluye operaciones o procesos en los que se hace una transformación de los residuos, ya sea física, química o biológicamente, con el objetivo de optimizar su gestión, rescatar materiales con potencial de aprovechamiento, recuperar subproductos de conversión (como el compost) o recuperar energía en forma de calor o biogás combustible" (Correal & Rihm, 2022). Dentro de las operaciones de valorización se encuentra el reciclaje, donde los residuos son transformados en productos, materiales o sustancias nuevas, que cumplan la misma finalidad antes de desecharse u otro fin (Victoria Calambas, Marmolejo Rebellón, & Torres Lozada, 2012).

5.3 Marco teórico

5.3.1 Contexto de los residuos plásticos a nivel nacional

Colombia tiene más de 50 millones de habitantes y se estima que cada persona desecha alrededor de dos kilogramos de plástico al mes, de igual forma, según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, en el territorio nacional se generan cerca de 12 millones de toneladas de basura al año, de las cuales se recicla en promedio un 17% de los cuales aproximadamente la mitad corresponde a plásticos de un solo uso (Silva Salamanca & Mejía Osorio, 2020) como pitillos, cubiertos, platos, tapas y envases, entre otros utensilios.

Específicamente, en cuanto al tereftalato de polietileno o PET, de acuerdo con Suárez Zarta (2016) en el año 2015 en el país se recuperaron entre 3.000 y 3.500 toneladas de envases PET, es decir que para ese año se reciclaba alrededor del 26% del total de botellas plásticas, encontrándose debajo del promedio mundial de alrededor del 41% de reciclaje de PET. De forma más reciente, se estima que Colombia consume 150.000 toneladas de botellas PET al año, de las que apenas se recicla cerca del 30%, lo que indica que de cada 10 botellas plásticas que salen al mercado, solo el 2,5 o 3 se reciclan (Salcedo Reina, 2021).

De acuerdo con el Informe Sectorial de la Actividad de Aprovechamiento 2020, de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, después del papel y cartón, el plástico es el segundo material más aprovechado en el país, y el PET es el segundo tipo de plástico que más se aprovecha, lo que corresponde a un 27% de los residuos de este material. Este informe también señala que posiblemente, debido a la emergencia sanitaria COVID-19 se tuvo un incremento tanto de reporte de toneladas como de precios en la gran mayoría de plásticos, donde para el caso del PET el incremento de precio para este año fue de un 3% (Superservicios & DNP, 2022).

Tal y como las cifras lo demuestran, aunque en el país se han hecho esfuerzos para reciclar los residuos de plástico PET, como envases y botellas plásticas, y evitar el impacto de estos, más de la mitad de estos materiales van al relleno sanitario o se disponen inadecuadamente en el ambiente por lo que no son aprovechados. De acuerdo con Plastic Oceans International, una organización sin fines de lucro con sede en Estados Unidos, que busca acabar con la contaminación plástica y fomentar comunidades sostenibles en todo el mundo, el reciclaje de plástico PET en Colombia, particularmente de las botellas, presenta varios retos y desafíos, dentro de los que se destacan:

1. La dificultad de reciclar botellas de colores oscuros no translúcidos; los envases transparentes y sin pigmentar son los más fáciles y económicos de reciclar. En Colombia, las botellas PET de bebidas a base de malta de cebada como 'Pony Malta', se caracterizan por ser color marrón, conocidas también como 'Amber PET', y para reciclar sus botellas la principal alternativa es vendérselas a estas mismas empresas fabricantes porque no se puede mezclar con PET de otro color (Minneboo, 2019).

2. Las botellas con etiquetas pintadas: el pintar etiquetas permite ahorrar costes y evitar el proceso de imprimir las etiquetas y pegarlas; sin embargo, “la pintura hace que esa parte de la botella de PET no sea apta para el reciclaje, ya que la pintura se mezcla con el contenido reciclado y contamina el lote” (Minneboo, 2019)

3. Etiquetas de plástico: la mayoría de las empresas de refrescos utilizan dos tipos diferentes de etiquetas en sus botellas las que están hechas de polietileno y las que se hacen de cloruro de polivinilo o PVC, estas últimas, cuyo reciclaje es mucho más complejo y suelen ser desechadas a la basura (Minneboo, 2019).

Un momento crítico a nivel nacional fue en el año 2020, durante la emergencia sanitaria por la pandemia de COVID-19, cuando aumentó significativamente el consumo de plásticos de un solo uso como bolsas, film, vajillas, empaque de poliestireno expandido o icopor, entre otros, puesto que estos empaques eran la opción más segura para evitar el contagio (Durán González, 2020). Así pues, durante la emergencia, se expidieron varias resoluciones (como: la Resolución 735/2020, la Resolución 666/2020, la Resolución 675/2020, la Resolución 737/2020, entre otras) en las que se propiciaba el uso de plásticos de un solo uso para el empaque sobre todo de alimentos y domicilios como medida de bioseguridad (Durán González, 2020). Lo que provocó que varios establecimientos comerciales incrementaran su uso de poliestireno expandido (o "icopor"), film, bolsas, vasos y cubiertos desechables.

Sin embargo, en los últimos años la industria del plástico ha venido desarrollado diversos proyectos para que las empresas afiliadas aporten y se concienticen sobre la responsabilidad ambiental que tiene en cuanto a estos materiales, y por ello, en la actualidad a nivel nacional se reciclan alrededor de entre 300.000 a 350.000 toneladas de material plástico por año, según Acoplásticos (Estrada Rudas, 2021).

Recientemente, el Congreso de Colombia emitió la ley 2232 del 07 de julio 2022 con la que se establecen disposiciones y lineamientos para la reducción de la producción y el consumo de plásticos de un solo uso en el país, encaminándose hacia la sustitución gradual de estos por alternativas más sostenibles y propiciando el cierre de ciclos. En el artículo 2 de esta ley se definen los *plásticos de un solo* uso como:

> Productos de plástico que no han sido concebidos, diseñados o introducidos en el mercado para realizar múltiples circuitos, rotaciones o usos a lo largo de su ciclo de vida, independientemente del uso repetido que le otorgue el consumidor. Son diseñados para ser usado una sola vez y con corto tiempo de vida útil, entendiendo la vida útil como el tiempo promedio en que el producto ejerce su función (Ley 2232, 2022).

Así, en los artículos 4 y 5 de dicha ley, se plantea el prohibir en plazos estipulados la introducción en el mercado, comercialización y distribución, de diversos productos (ver *Tabla 2*) fabricados, total o parcialmente, con plásticos de un solo uso, incluidos los producidos con plástico oxodegradable. Se exceptúan los productos que se usan con fines médicos, por razones de asepsia, higiene y salud, para la contención de sustancias químicas y residuos peligrosos, los que están hechos en un 100% de material reciclado, entre otros.

Así mismo, se plantea una Política Nacional de Sustitución del Plástico de Un Solo Uso que deberá ser elaborada y puesta en marcha por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). El artículo 7 de dicha ley indica que esta política tendrá como objeto principal la reducción de la producción y consumo de productos plásticos de un solo uso, contribuyendo al cumplimiento del Plan Nacional para la Gestión Sostenible de los Plásticos de un Solo Uso, publicado en el año 2021.

Tabla 2. *Productos plásticos de un sólo uso prohibidos por la ley 2232 de 2022.*

Artículos 5 y 6 de la Ley de Plásticos de un Solo Uso	
Productos plásticos de un solo uso prohibidos	**Vigencia de prohibición**
Bolsas de punto de pago para embalar, cargar o transportar paquetes y mercancías, excepto las reutilizables o de uso industrial.	2 años
Bolsas para el embalaje de periódicos, revistas, publicidad y facturas, y las utilizadas en lavanderías para empacar ropa lavada.	2 años
Rollos de bolsas vacías en sitios comerciales para embalar, cargar o transportar paquetes, mercancías o alimentos a granel, excepto para productos de origen animal crudos	2 años
Envases, empaques, recipientes y bolsas para contener líquidos no preenvasados, de consumo inmediato, o domicilios.	8 años
Platos, bandejas, cuchillos, tenedores, cucharas, vasos y guantes para comer.	8 años
Mezcladores y pitillos para bebidas	2 años
Soportes plásticos para las bombas de inflar	2 años
Confeti, manteles y serpentinas.	8 años
Envases, empaques y recipientes para comidas o alimentos de consumo inmediato usados para entregas a domicilio	8 años
Láminas para servir, empacar, envolver o separar alimentos de consumo inmediato, utilizados para llevar o para entrega a domicilio.	8 años
Soportes plásticos de los copitos o hisopos flexibles con puntas de algodón.	2 años
Mangos para hilo dental o porta hilos dentales de uso único.	8 años
Empaques, envases o cualquier recipiente empleado para la comercialización de vegetales que en estado natural cuenten con cáscaras. Excepto si son totalmente reciclables y/o reciclados, y tengan metas de reincorporación de economía circular.	8 años
Adhesivos, etiquetas o cualquier distintivo que se fije a los vegetales.	8 años

Fuente: Elaboración propia a partir de información de la Ley 2232 de 2022.

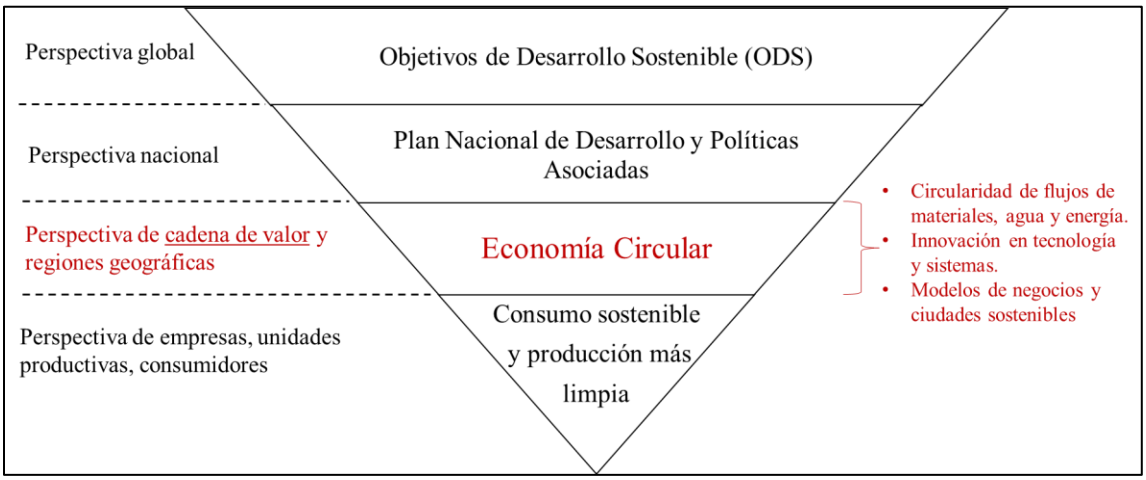
Esta ley es un primer paso para abordar la problemática de los plásticos en el país, articulándose también con los principios de economía circular y de responsabilidad extendida del productor. De igual manera, dentro de la ley también se contemplan sanciones a quienes incumplan la norma.

5.3.2 Economía circular en Colombia respecto al plástico

Desde el año 2018, Colombia cuenta con la Estrategia Nacional de Economía Circular (ENEC), el cual es un instrumento con el que cuenta el país para encaminarse hacia el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible, donde se busca no sólo una transformación productiva sino también cultural. Esta estrategia surge dentro del contexto en el que Colombia debe acelerar las acciones y compromisos adquiridos en el Acuerdo de París donde se busca reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y para evitar que la temperatura global incremente en más de 2°C. De igual forma, como miembro de la ONU, el país también está llamado a trabajar en el cumplimiento de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), entre los que la Economía Circular aparece como un eje transversal a varios de ellos

(Salamanca Galvis, 2021). En la siguiente figura se presenta la relación de la economía circular con las perspectivas de política pública para promover el desarrollo sostenible del país.

Figura 2. *Economía circular en relación con diversas perspectivas para el desarrollo sostenible.*



Fuente: Van Hoof, 2019, tomado de la Estrategia Nacional para la Economía Circular (Gobierno de la República de Colombia, 2019).

Así pues, con esta estrategia se busca el incremento de la productividad y se promueve la optimización de sistemas productivos enfocados en el valor agregado de materiales, se introducen nuevos modelos de negocio, como los encadenamientos y el fortalecimiento de cadenas de valor (Gobierno de la República de Colombia, 2019). Según la ENEC y Ellen MacArthur Fundación, impulsar la economía circular trae beneficios económicos, ambientales y sociales, algunos de los que se describen a continuación:

Tabla 3. *Principales beneficios de impulsar la economía circular en Colombia.*

Beneficios de la economía circular	
Beneficios económicos	- La reducción de costos de producción. Debido a la valorización de los recursos en repetidos ciclos. - Apertura de nuevos mercados a partir del consumo sostenible. - Atracción de nuevas fuentes de financiación. - Innovación en nuevos productos y modelos de negocios. - Sistemas de infraestructura sostenible.
Beneficios ambientales	- Reducción en la extracción de materias primas, lo que disminuye la presión sobre los recursos naturales y los servicios ecosistémicos. - Transición de un consumo energético basado en combustibles fósiles a uno con mayor participación de energías renovables. - Reducción de residuos y emisiones de gases de efecto invernadero. - Conservación de fuentes de recursos y uso eficiente del agua.
Beneficios sociales	- Cambio cultural hacia un nuevo paradigma de circularidad en la producción y consumo. - Involucrar a la población en el manejo de residuos y el poder del consumo sostenible, dirigido a la prevención de la generación de residuos y la separación en la fuente. - Inclusión de recicladores en esquemas de retorno de materiales al ciclo productivo. - Generación de empleos que surgen de nuevos modelos de negocio y mercados.

Fuente: Ellen MacArthur Foundation, 2014, tomado y adaptado de la Estrategia Nacional para la Economía Circular (Gobierno de la República de Colombia, 2019).

Según la ENEC, se estima que en Colombia el potencial de la economía circular podría alcanzar 11,7 mil millones de dólares anuales en ahorros de materiales y oportunidades de nuevos negocios, también los beneficios ambientales generados aportarían a las metas de reducción de gases de efecto invernadero y uso de sustancias tóxicas, pactados en el Acuerdo de París (Gobierno de la República de Colombia, 2019). Además del enfoque en mecanismos de gestión y política pública, dentro de la estrategia se abordan seis líneas de acción:

1. Flujo de materiales industriales y productos de consumo masivo.
2. Flujos de materiales de envases y empaques.
3. Flujos de biomasa.
4. Fuentes y flujos de energía.
5. Flujo del agua.
6. Flujos de materiales de construcción.

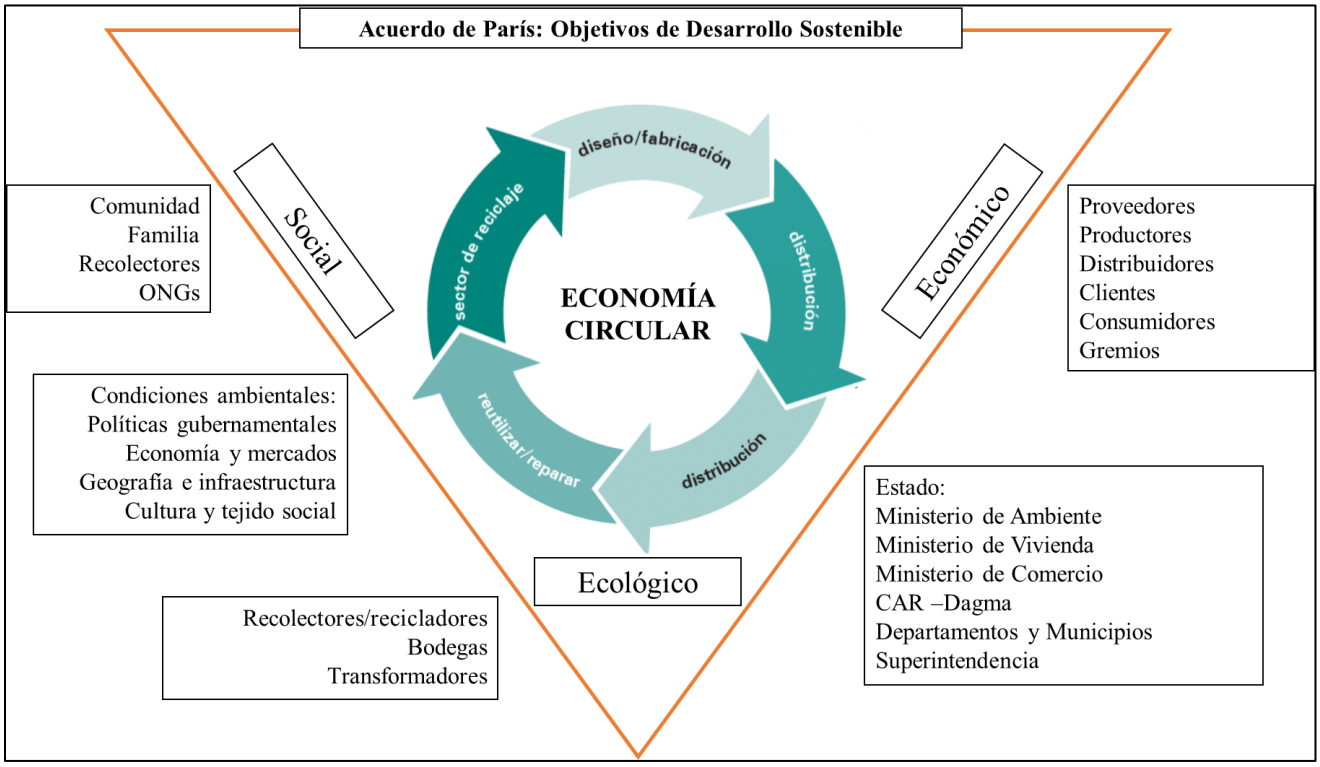
Cada una de estas líneas plantean indicadores, metas de corto y largo plazo y acciones dirigidas a la innovación en modelos de producción y consumo para convertirlos en modelos circulares (Gobierno de la República de Colombia, 2019). Para el caso del plástico de un solo uso, la línea de acción que lo aborda es "flujos de materiales de envases y empaques", dentro de la cual se enmarca la Mesa Nacional para la Gestión Sostenible del Plástico, una instancia colaborativa de trabajo constituida en diciembre de 2018, donde participan diversos actores públicos y privados asociados a la cadena del plástico (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022).

A partir de este mesa se generó el *Plan Nacional para la Gestión Sostenible de los Plásticos de un Solo Uso*, el cual está orientado a establecer instrumentos encaminados a solucionar la problemática de los plásticos, especialmente los de un solo uso, y su inadecuada disposición en el ambiente, abarcando varias líneas estratégicas como: investigación, ecodiseño, prevención de micro plásticos, articulación del servicio público de aseo, gestión de información y conocimiento, gestión de recursos, entre otras (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022). Dicho plan tiene como misión:

> Implementar la gestión sostenible del plástico a partir de instrumentos y acciones en prevención, reducción, reutilización, aprovechamiento, consumo responsable, generación de nuevas oportunidades de negocio, encadenamientos, empleos y desarrollos tecnológicos, con el fin de proteger los recursos naturales y fomentar la competitividad (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022).

Particularmente, en cuanto al plástico PET en Colombia que se encuentra principalmente en envases, Zapata Bravo, Vieira Escobar, Zapata-Domínguez, & Rodríguez-Ramírez (2021), en su estudio *The Circular Economy of PET bottles in Colombia*, construyeron el ecosistema de economía circular del PET que se muestra a continuación:

Figura 3. *Ecosistema colombiano para la Estrategia de Economía Circular del PET.*



Fuente: tomado de Zapata Bravo, Vieira Escobar, Zapata-Domínguez, & Rodríguez-Ramírez, 2021.

En este ecosistema se plantea como parte fundamental el Acuerdo de París, y los objetivos de Desarrollo Sostenible, en los cuales se encamina la economía circular. De igual forma, también se considera la figura del Estado que se encarga de formular las regulaciones en materia ecológica y/o ambiental, para lograr la sostenibilidad de las actividades. De igual manera, el ecosistema está condicionado por las políticas gubernamentales, la economía y los mercados, la cultura, el tejido social, y la geografía e infraestructura (Zapata Bravo, Vieira Escobar, Zapata-Domínguez, & Rodríguez-Ramírez, 2021).

El ecosistema de economía circular para PET también involucra componentes de sostenibilidad:

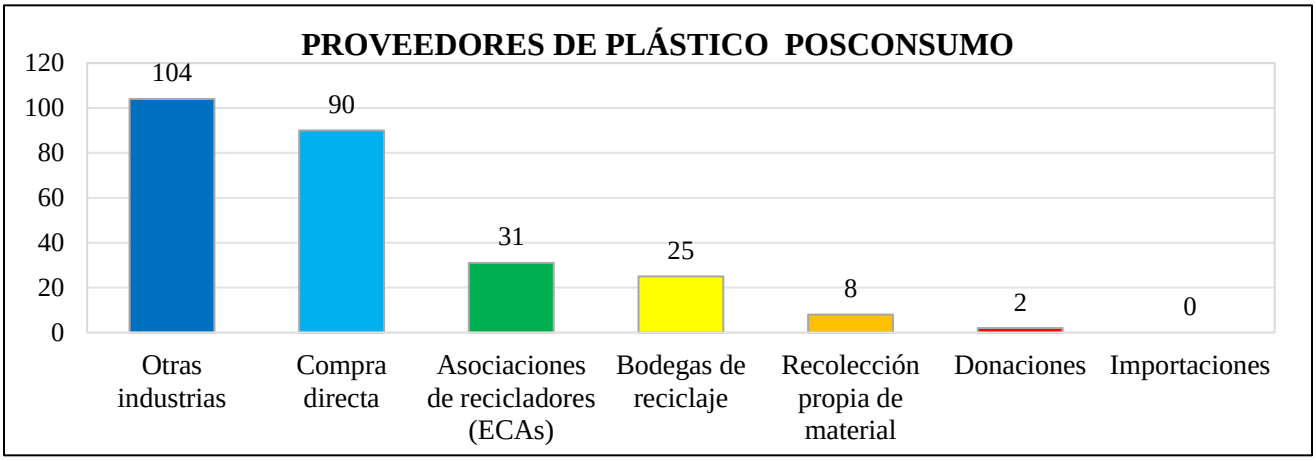
- El componente social, conformado por el tejido social, dentro del que se encuentra la comunidad, la familia, recolectores y/o recicladores, ONGs y organismos nacionales.
- El componente económico, conformado por actores caracterizados por las relaciones de intercambio dentro de la economía, como productores, proveedores, distribuidores, clientes, consumidores y gremios de la producción.
- El componente ecológico, cuyos actores corresponden a los recolectores/recicladores, bodegas y transformadores.

Un estudio realizado por Acoplásticos junto con la Universidad Piloto de Colombia, en el que se caracterizaron doscientas empresas de Bogotá dedicadas al reciclaje de plástico posconsumo, afirma que estas empresas transforman en promedio 9.000 toneladas por mes, que al año son cerca de 110 mil toneladas de desechos plásticos reciclados. Así mismo, de estas 200 empresas, 116 transforman el residuo

plástico posconsumo hasta un producto final como, artículos de aseo, envases, juguetes, madera plástica, mangueras, muebles, entre otros, y las restantes lo transforman hasta materia prima como fibra y gránulos que se comercializan a industrias para fabricar nuevos productos (Acoplásticos, 2019).

El estudio mencionado se titula ***Informe Técnico- Proyecto "Perfilar 200 empresas transformadoras de Plástico posconsumo en Bogotá" 2019***, donde se menciona que de las 200 empresas caracterizadas más de la mitad obtienen el material para transformación, comprándoselo a otros sectores como clínicas, comercializadoras, empresas productoras de plástico, plazas de mercado, restaurantes y supermercados (ver *Figura 4*). Unas 90 empresas compran directamente el material a recicladores de oficio, 31 se lo compran a asociaciones de recicladores de oficio o a Estaciones de Clasificación y Aprovechamiento (ECAs) que prestan el servicio en Bogotá, y 25 lo obtienen a través de bodegas. El restante recolecta de forma directa el material o reciben donaciones empresariales y ninguna empresa importa material (Abaunza Barón, Castellanos Cuadrado, & Malagón Rodríguez, 2019, pág. 13).

Figura 4. *Proveedores de las empresas de transformación de plástico en Bogotá.*



Fuente: Adaptado de Abaunza Barón, Castellanos Cuadrado, & Malagón Rodríguez, 2019.

El polietileno de alta densidad (PE-AD) y el polietileno de tereftalato (PET) son los dos tipos de plástico que más reciben las empresas caracterizadas para su transformación, con 3.628 y 2.706 toneladas al mes, respectivamente. Le siguen, el polietileno de baja densidad (PE-BD) con 1.710 ton, el polipropileno (PP) con 1.134 ton, el policloruro de vinilo (PVC) con 421 ton y el poliestireno (PS) con 104 ton (Abaunza Barón, Castellanos Cuadrado, & Malagón Rodríguez, 2019). Específicamente, en cuanto al polietileno de tereftalato o PET, el estudio revela que el 19% de las empresas caracterizadas realizan transformación de este material, es decir unas 37 organizaciones (Abaunza Barón, Castellanos Cuadrado, & Malagón Rodríguez, 2019, pág. 21). En la siguiente tabla se muestran las cantidades de PET empleadas por las empresas mensualmente:

Tabla 4. *Cantidades de PET trabajadas por las empresas de transformación de plástico en Bogotá.*

Capacidad de Transformación de PET al Mes	
Cantidad de PET	**Ton**
Cantidad de material recibido	2.706
Cantidad de material transformado	2.317
Promedio de cantidad mensual transformada por empresa	63

Nota: Adaptado de Abaunza Barón, Castellanos Cuadrado, & Malagón Rodríguez, 2019.

El estudio entonces se muestra alentador en la medida de que muestra que el reciclaje se proyecta como una solución tangible y real de la problemática con los residuos plásticos, a la vez que es también una oportunidad de empleo y desarrollo social (Acoplásticos, 2019).

5.3.3 Impacto ambiental de los residuos de plástico PET

La principal preocupación por la con los residuos plásticos, y particularmente el PET es la durabilidad del material en el ambiente y su constante empleo en la cotidianidad de la población. Así pues, una botella plástica puede tardar siglos en degradarse; y en la actualidad es difícil que la población en general pueda prescindir del uso de las botellas plásticas (Silva Salamanca & Mejía Osorio, 2020), por lo que la mejor opción para reducir los residuos plásticos en el ambiente es fomentar el reciclaje o reemplazar el material por uno más sostenible, de manera que se busque reducir el impacto ambiental que causan las grandes cantidades de desechos plásticos.

De acuerdo con Angulo Martínez (2022), algunos de los principales impactos de los residuos de plástico PET en el ambiente son los siguientes:

Tabla 5. *Principales impactos ambientales causados por la inadecuada gestión de residuos de PET.*

Componente ambiental	Factor ambiental	Impacto	Descripción del impacto
Abiótico	Suelo	Afectación a la calidad del suelo	Los envases PET cubren la capa vegetal y natural, limitando el desarrollo de vegetación y microorganismos.
			Las partículas de PET pueden ser un vector para transferir metales pesados como Pb y Cd a la rizosfera de las plantas. También pueden alterar la agregación del suelo, la comunidad microbiana, la inmovilización de nutrientes y causar fitotoxicidad.
	Agua	Alteración en cuerpos de aguas superficiales	El PET puede formar una capa superior en los cuerpos de agua dificultando el ingreso de rayos solares al ecosistema acuático alterando el equilibrio hidrobiológico.
		Contaminación marítima	Contribuir en la conformación de las islas flotantes oceánicas de plástico.
	Aire	Alteración del aire	La incineración de PET emite de gases de efecto invernadero como el CO_2 y, genera "hollín" con dioxinas de alto nivel tóxico
Biótico	Fauna	Afectaciones en fauna marina	Muerte de peces por ingesta de fragmentos plásticos, incluyendo el PET. Afectación a otras especies como el plancton, los crustáceos, entre otros.
	Flora	Disminución de la cubierta, y abundancia de flora	Los residuos de PET obstaculizan el desarrollo de vegetales y comunidades biológicas, restando nivel orgánico en la cubierta natural.

Socio - económico	Social	Disminución de la calidad paisajística	Debido a la acumulación de residuos de PET en espacios públicos, áreas verdes, canales de desagüé, sitios turísticos como playas, entre otros.
		Inundaciones	Los residuos de botellas de PET contribuyen al taponamiento de las estructuras de desagüe de calles, aumentando la vulnerabilidad ante estos eventos.
		Afectación a la salud humana	La acumulación de residuos puede contribuir a la proliferación de vectores de enfermedades epidemiológicas.
		Disminución de la vida útil rellenos sanitarios	Debido a los altos volúmenes de residuos de envases PET que se generan y siendo en el mejor de los casos su destino final los rellenos sanitarios.

Fuente: Adaptado de Ángulo Martínez, 2022.

En Colombia se han hecho varios estudios para conocer el impacto ambiental de los productos hechos con PET, y uno de los problemas que destacan es el embotellamiento de agua, cuyos impactos ambientales no sólo son provocados por los residuos de envases que al ser utilizados quedan en los ríos o bosques, sino también por el gran consumo de energía durante todo el proceso de manufacturación (Silva Salamanca & Mejía Osorio, 2020). El problema con este tipo de plásticos se acrecienta principalmente por la incidencia actual de los plásticos en el desarrollo social y material del ser humano, puesto que "la sociedad de consumo ha llevado a ver que la vida debe ser más fácil y generar menos inconvenientes en el desarrollo de las actividades diarias" (Silva Salamanca & Mejía Osorio, 2020), por lo que el uso constante de estos materiales de carácter "desechable" es una opción fácil y cómoda para muchos consumidores y productores.

Sin embargo, a partir de este problema también ha surgido una oportunidad, en la que, a nivel nacional unos 60.000 recicladores en todo el país trabajan en la recuperación y la reintegración de estos residuos al ciclo productivo, lo que genera cada día más empleo, tanto formal como informal, puesto que dependen de esta actividad para ganarse la vida (Minneboo, 2019). Estas personas son claves para la transformación hacia una economía circular y para evitar que muchos de estos residuos terminen en el ambiente provocando los impactos antes mencionados, puesto que "cubren gran parte del territorio nacional, aumentando las tasas de reciclaje y garantizando volumen de productos plásticos post consumo, haciendo del reciclaje un negocio sostenible en el tiempo" (Minneboo, 2019).

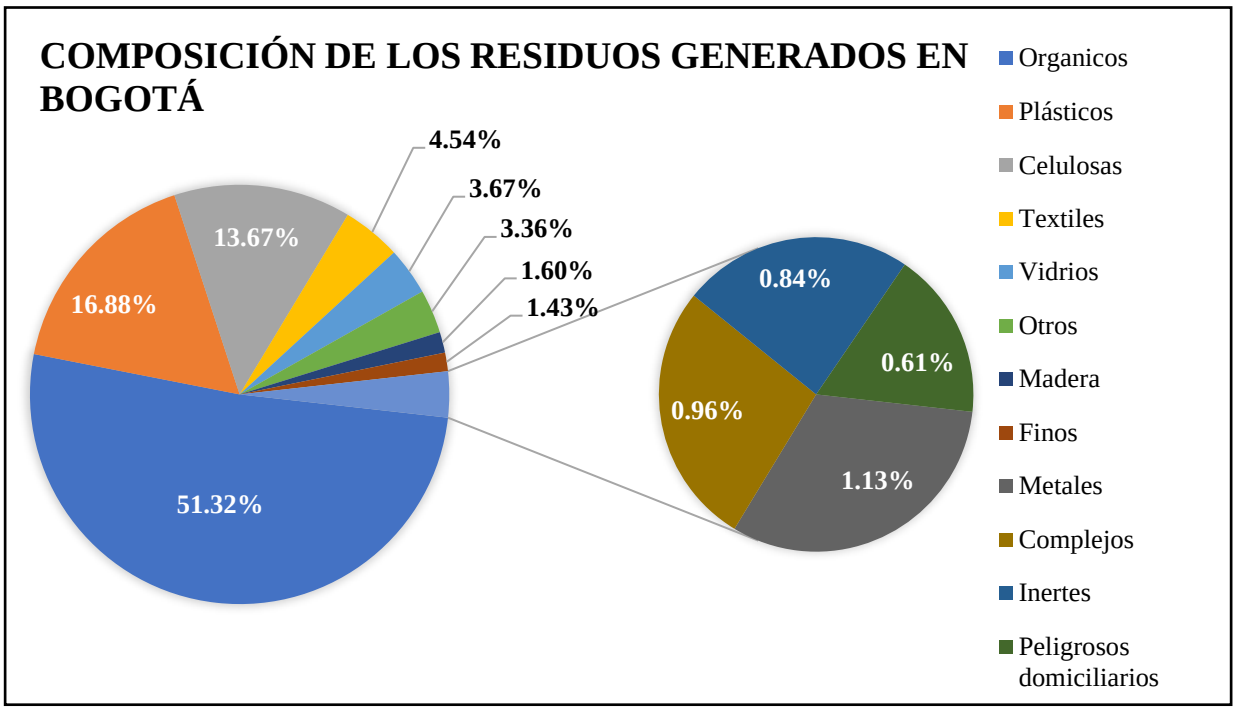
5.3.4 La gestión y manejo de residuos en Bogotá

La ciudad de Bogotá cuenta con su Plan Distrital de Desarrollo (PDD) para el periodo 2020-2024 llamado "Un nuevo contrato social y ambiental para la Bogotá del siglo XXI", y dentro del marco de este se encuentra el Decreto 345 del 30 de diciembre de 2020, con el cual se adopta la actualización del PGIRS de la ciudad. Así mismo, el documento CONPES No. 3874 del 21 de noviembre de 2016, que traza como camino a seguir el modelo de Economía Circular, se establece como Política Pública para la Gestión Integral de Residuos Sólidos (Vargas, 2022) buscando en cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible.

De acuerdo con el estudio realizado por la Red Colombiana de Ciudades Cómo Vamos en el año 2014, sobre la Política Pública de Reciclaje en cinco ciudades del país, Bogotá recicla apenas el 3,97% de los residuos producidos en la ciudad anualmente; un porcentaje bajo en comparación con ciudades como

Medellín que recicla alrededor del 17,45% de sus residuos anuales y Barranquilla con un 5,5% (Bogotá Cómo Vamos, s.f.). Así mismo, en la ciudad se genera una gran variedad de residuos, tal y como se aprecia en la siguiente figura, donde los materiales que predominan en los residuos son los orgánicos y los plásticos. Lo anterior, de acuerdo con una consultoría realizada en 2017 por el consorcio NCU y la UAESP, donde también se indicaba que para este mismo año la producción per cápita de residuos (PPC) era de "0,855 Kg/Hab-día, manteniendo la tendencia reportada en el Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos PGIRS 2016, cuya PPC era de 0,8 Kg/Hab-día" (NCU & UAESP, 2017). Actualmente, según la última actualización al PGIRS de Bogotá, la PPC es de 1,13 Kg/Hab-día.

Figura 5. *Composición macroscópica de los residuos en Bogotá a 2017.*

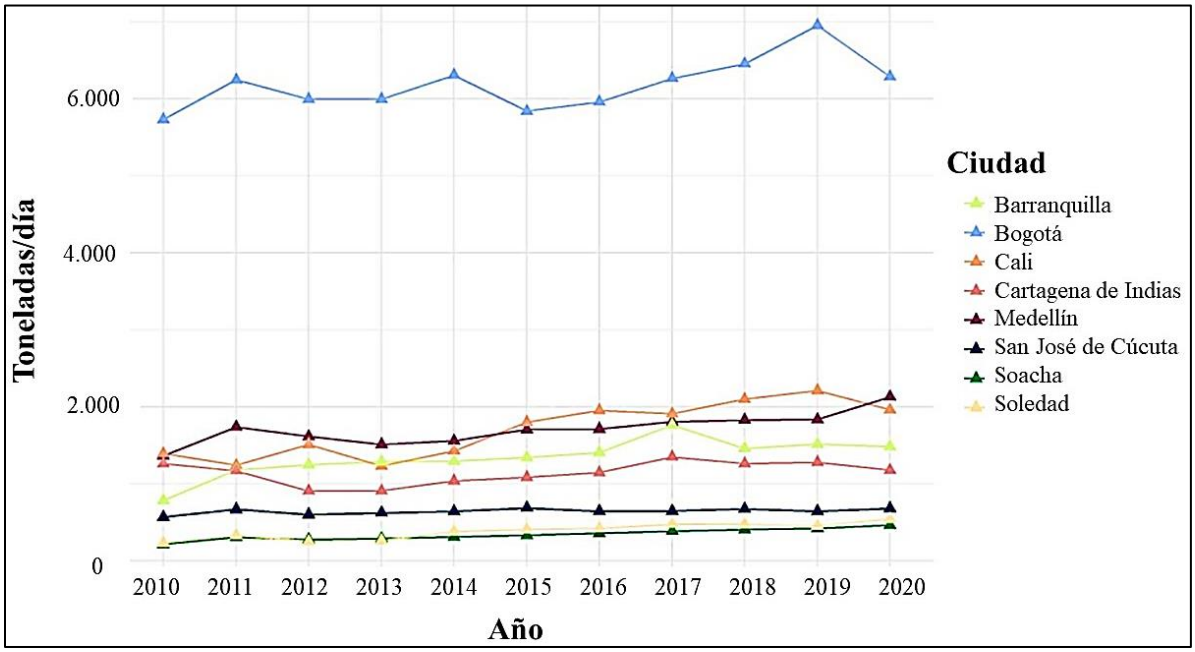


Fuente: Elaboración propia con datos de Consorcio NCU & UAESP, 2017.

En cuanto a la disposición de residuos sólidos, del total de toneladas diarias dispuestas en todo el país, el 45,23% corresponde a las 8 ciudades con mayor población *(Figura 6)*, dentro de las que se destaca la ciudad de Bogotá, que es la ciudad con mayor promedio de residuos sólidos dispuestos (más de 6.000 toneladas/día) con 2.263.624,57 toneladas de residuos anuales dispuestos en 2020 (Superservicios & DNP, 2021).

El principal sitio donde se disponen los residuos de la ciudad es el Relleno Sanitario Doña Juana, donde no sólo se reciben los residuos de Bogotá sino también los de otros ocho municipios y que para diciembre del año 2020 contaba con 4,2 años de vida útil (Superservicios & DNP, 2021). De acuerdo con el *Informe Nacional De Disposición Final De Residuos Sólidos 2020*, para el año 2019 se registró en promedio la disposición de 6.952,49 ton por día en el Relleno Doña Juana, mientras que para el 2020 la cifra fue de 6.287,85 ton (Superservicios & DNP, 2021); mostrando una reducción de más de 600 ton que puede atribuirse a la situación de salud pública con el COVID-19 y la recesión económica que afectaron el consumo de bienes y servicios, así como también los hábitos de consumo (Vargas, 2022).

Figura 6. *Serie histórica de disposición de residuos sólidos en el periodo 2010 – 2020, para las 8 ciudades con mayor población del país.*



Fuente: Informe Nacional de Disposición Final de Residuos Sólidos 2020 (Superservicios & DNP, 2021).

Bogotá tiene una relación con sus residuos caracterizada por un desconocimiento de gran parte de la ciudadanía en torno a la gestión de estos, existe una ruptura entre el consumo de productos y el manejo de los residuos. Donde no es visible la problemática de las basuras y los desechos, desconociendo su impacto y, por tanto, no se comprende de manera clara y consciente la responsabilidad que los consumidores tienen sobre la extracción de materia prima, los residuos que ellos mismos producen y el manejo que se les da (Núñez Amórtegui, 2016, pág. 17). Es por ello, que en la ciudad se debe trabajar en la masificación de las campañas de sensibilización y educación ambiental sobre la separación en fuente y el uso adecuado de los contenedores y las bolsas plásticas; todo ello, encaminado a lograr un cambio de actitud por parte de los ciudadanos.

Es importante que se trabaje en la transformación en los valores culturales de la ciudadanía, para concientizarla sobre la responsabilidad que tienen sus patrones de consumo sobre sus residuos generados, a través de la educación ambiental, mejorando también la eficiencia del reciclaje (Sánchez-Muñoz, Cruz Cerón, & Giraldo Uribe, 2019).

La gestión de los residuos en la capital es una tarea conjunta que requiere que la Administración Distrital trabaje con diversos actores, tales como: el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, el Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, y el Ministerio de Transporte. También con entes descentralizados como la Superintendencia de Servicios Públicos (SSPD), la Comisión Reguladora de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA), y la Agencia Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), y otros entes como la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos (UAESP) que hace parte de la Secretaría Distrital del Hábitat (Vargas, 2022).

Un actor social muy importante para la gestión de residuos de la ciudad son los recicladores. De acuerdo con Vargas (2022), contar con esta población es fundamental para sustentar y afianzar la Economía Circular, por lo que la Administración Distrital debe trabajar por proveer las herramientas

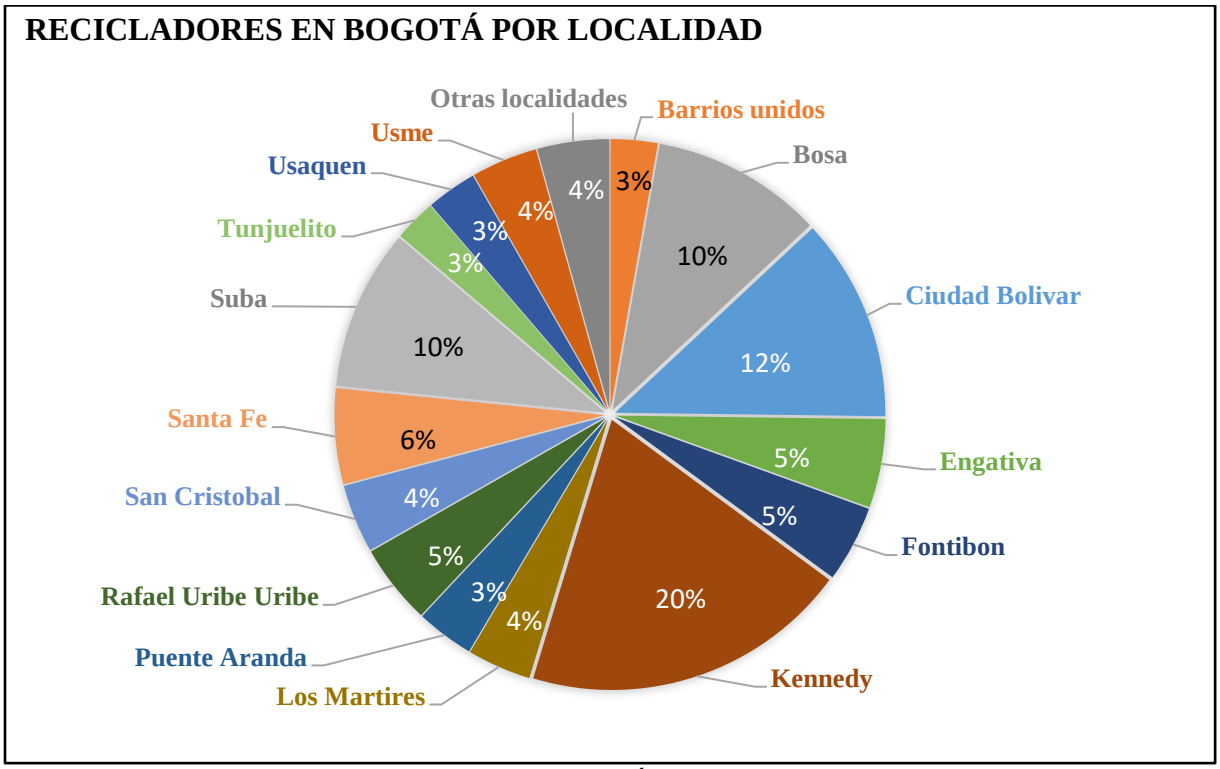
necesarias que le garantice al reciclador de oficio el acceso cierto y seguro al material potencialmente reciclable. Sin embargo, una de las mayores dificultades que se ha presentado en este aspecto es la marginación a la que han sido sometidos los recicladores, "llegando incluso a ser denominados desechables, en una suerte de símil a la concepción que la gente tenía (y tiene) de sus residuos" (Núñez Amórtegui, 2016, pág. 7). Por lo que el trabajo con recicladores no sólo debe limitarse al manejo de residuos sino también involucrar a toda la ciudadanía a generar acciones que permitan que esta población tenga acceso a su derecho a la igualdad y al trabajo, es decir, fomentar el *reciclaje inclusivo.*

En la ciudad se debe trabajar para que la educación ambiental trascienda hacia la *cultura ambiental*, para que los diversos actores trabajen en una gestión de residuos sólidos que sea coherente con la economía circular. Para ello se deben propiciar campañas educativas que sean precisas, cortas y contundentes, planes de gestión integral de residuos sólidos vinculantes entre el Estado, la empresa privada y los ciudadanos y un papel activo del Estado para que realice el control y garantice el cumplimiento de la legislación ambiental (Sánchez-Muñoz, Cruz Cerón, & Giraldo Uribe, 2019).

5.3.5 Panorama de la población recicladora en la ciudad de Bogotá

De acuerdo con el Registro Único de Recicladores de Oficio (RURO) de la UAESP, al 28 de julio de 2022, se contaba con unos 25.259 recicladores registrados, de los cuales alrededor de 1.138 se consideran habitantes de calle (UAESP, 2022). Las localidades con mayor cantidad de población recicladora registrados son: Bosa (1.289), Ciudad Bolívar (1.367), Engativá (515), Kennedy (2.101), Santa Fe (624) y Suba (1.117). En la siguiente figura se muestra la distribución de esta población en cada una de las localidades:

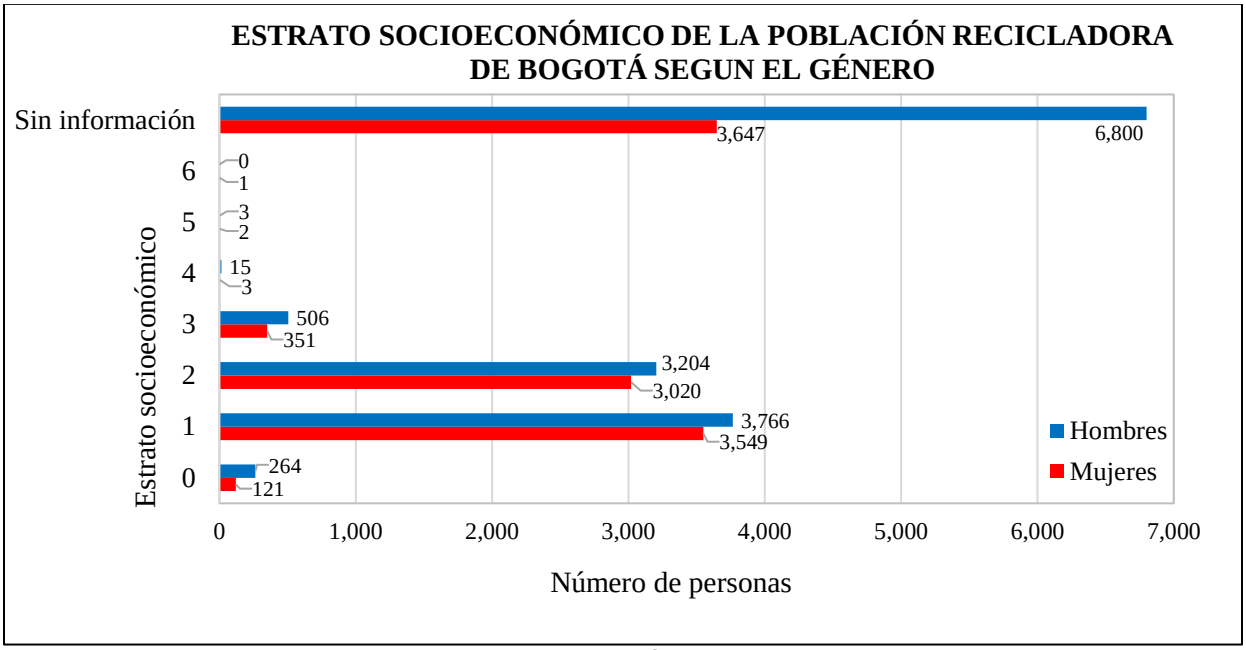
Figura 7. *Porcentaje de recicladores registrados en el RURO por localidad, a julio de 2022.*



Fuente: Elaboración propia con datos tomados del Registro Único de Recicladores de Oficio – RURO (UAESP, 2022).

Del total de recicladores registrados en el RURO, un 42,35% son mujeres y un 57, 65% son hombres, así mismo, la mayoría de esta población se concentran principalmente en los estratos 1 y 2, tal y como se aprecia en la siguiente figura:

Figura 8. *Estrato socioeconómico de la población recicladora de Bogotá, según el género a julio de 2022.*



Fuente: Elaboración propia con datos tomados del Registro Único de Recicladores de Oficio – RURO (UAESP, 2022).

A lo largo de la historia, en Bogotá, generalmente se ha considerado a los recicladores como trabajadores informales, lo que hace que se desconozca su rol fundamental en la gestión de los residuos urbanos. La labor de estas personas se ha visto rodeada de diversos mitos que contribuyen a alimentar políticas represivas, negligentes e ineficientes que no benefician las condiciones de trabajo y de vida de los recicladores de oficio (Tovar, 2018).

> Varios mitos rodean la labor de reciclaje como por ejemplo que es un fenómeno reciente, que los recicladores son los más pobres dentro de los pobres, que es una actividad marginal y desorganizada con un impacto económico mínimo, además de considerarla una molestia que debe ser eliminada junto con los recicladores que, al no tener lugar en los sistemas modernos de gestión de residuos, no pueden ser integrados. (Tovar, 2018).

Para el caso de América Latina, sobre todo en las grandes ciudades, el reciclaje muchas veces sí ha estado enmarcado dentro de la actividad desarrollada por población marginada, personas que no encuentran alternativas en el mercado laboral y han visto en el reciclaje una opción de vida, buscando los materiales más rentables dentro de los residuos para su recolección (Núñez Amórtegui, 2016, pág. 10). De manera general, la labor del reciclaje se ha visto rodeada por un desconocimiento frente a esta población, por lo que diversas organizaciones han venido trabajando en la dignificación y visibilización del reciclaje de oficio y su inclusión en las políticas públicas de la ciudad.

La formalización de esta labor contribuye a reconocer la labor de los recicladores y los beneficios ambientales, sociales, económicos de dicha actividad, así mismo dentro de la gestión de los residuos se valoriza más el material, convirtiendo los residuos en una fuente de ingresos cuando anteriormente eran

considerados un riesgo para la salud pública y el medio ambiente (Tovar, 2018). Todo esto incrementa el interés de las entidades gubernamentales, las agencias de desarrollo y las entidades privadas por los residuos, viéndolos ya no como desecho sino como un recurso urbano y una fuente de ganancias para los municipios y las empresas (Tovar, 2018).

Para la formalización de los recicladores de oficio, en Colombia se cuenta con el decreto 596 de 2016, que fue construido de manera conjunta con representantes de más de 90 organizaciones de recicladores a nivel nacional, y en el que se define el esquema de operación de la actividad de aprovechamiento de residuos sólidos dentro del servicio público de aseo y el régimen de transición de las organizaciones de recicladores de oficio como personas prestadoras de este servicio (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2020).

El proceso de formalización consta de ocho fases que abarcan diversos registros y reportes, y desde la primera los recicladores pueden acceder a recursos de las tarifas de aseo. Para las organizaciones de recicladores el proceso tarda cinco años desde el registro de la organización ante la Superintendencia de Servicios Públicos, con ello se busca que estas organizaciones sean reconocidas oficialmente, se consoliden como prestadores del servicio público de aseo y puedan acceder a los recursos económicos del sistema (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2020).

En cuanto a la comercialización de materiales, de acuerdo con el RURO se tienen que los materiales que más comercializan son cartón, celulosa, plástico, vidrios y metales, y los lugares de venta de materiales a los que más acuden los recicladores son las organizaciones de recicladores, bodegas y chatarrerías (UAESP, 2022) como se aprecia en la siguiente tabla:

Tabla 6. *Panorama de comercialización de reciclaje en Bogotá a julio de 2022.*

Comercialización de materiales		**Lugares de venta de materiales**	
Material	**No. de recicladores que comercializan el material**	**Lugar de venta de materiales**	**No. de recicladores que acuden al lugar de venta**
Cartón	13.829	Sin información	10.259
Periódico	1.018	Organización de recicladores	7.321
Celulosa	13.646		
Plegadiza	766	Bodega	6996
Plástico	13.920	Chatarrería	554
PET	1.476	Otro	89
Tatuco	874	Industria	25
Chirrión	202	Recoge el camión y lo pesa	12
Acrílicos	12.536		
Vidrios	13.769	A otros recicladores	3
Tetrapak	642		
Cobre	1.048		
Metales	13.544		
Chatarra	303		
Otros	373		

Fuente: Datos tomados de Registro Único de Recicladores de Oficio – RURO (UAESP, 2022)

Muchas veces, los principales ingresos de esta población constan de la venta de materiales recuperados a terceros. En base a esto, continuación, se presenta de manera general el rango de precios aproximados que se maneja en 2022 en el mercado del reciclaje en Colombia:

Tabla 7. *Precios promedio del mercado de reciclaje en Colombia y en Bogotá a agosto de 2022.*

Material		Precio (COP) por Kg de material		
Familia	**Subcategoría**	**Mínimo Nacional**	**Máximo Nacional**	**Promedio Bogotá**
Papel y Cartón	Cartón	$ 340	$ 1200	$ 879
	Plegadiza	$ 100	$ 1000	$ 319
	Archivo	$ 700	$ 2.000	$ 1.183
	Periódico	$ 100	$ 900	$ 484
	Tetrapak	$ 150	$ 800	$ 294
Vidrio		$ 50	$ 1.100	$ 168
Plástico	PET Cristal	$ 1.000	$ 3.800	$ 1.226
	PET otros	$ 100	$ 1.900	$ 615
	Rígido	$ 650	$ 3.000	$ 1.919
	Flexible	$ 100	$ 3.400	$ 1.294
	PS Expandido	$ 50	$ 1.000	$ 480
Metales	Chatarra	$ 600	$ 1.500	$ 897
	Aluminio	$ 3.000	$ 7.000	$ 5.343

Fuente: Adaptado de "Encuesta de Precios del Mercado de Reciclaje en Colombia: agosto 2022" (Acoplásticos, 2022).

Para el caso del tereftalato de polietileno o PET, que es el material abordado en el presente proyecto, este se comercializa a un mayor precio cuando es del tipo cristal, es decir el PET sin color o transparente, porque es mucho más fácil de transformar y no contiene los aditivos que el PET de diversos colores. Los envases plásticos de colores no se comercializan mucho y a menudo se debe hacer una clasificación por color, porque si se mezclan algunos colores durante la transformación del plástico a menudo se pueden obtener resultados indeseables, lo que implica un arduo trabajo de separación y clasificación.

Por otra parte, en cuanto al desarrollo metodológico de la presente monografía, a continuación, se presentan algunas teorías empleadas para ello:

5.3.6 Análisis cuantitativo de información: bibliometría

La bibliometría es parte de la cienciometría y trata de la aplicación de métodos matemáticos y estadísticos para analizar el curso de la comunicación escrita o literatura de carácter científico, así como a los autores que la producen; con ello se pretende cuantificar la actividad científica por medio de la aplicación de tratamientos cuantitativos a los datos bibliográficos de producciones científicas escritas y sus comportamientos (Escorcia Otalora, 2008). Es decir, la bibliometría se basa en el análisis cuantitativo de la producción científica de un tema en específico. Con este fin se emplean diversos instrumentos como lo son los indicadores bibliométricos, que son medidas que proporcionan información sobre los resultados de la actividad científica.

A través del estudio de los aspectos cuantitativos de la producción, diseminación y uso de la información, la bibliometría desarrolla modelos y medidas matemáticas que sirven para hacer pronósticos y tomar decisiones (Araújo Ruiz & Arencibia Jorge, 2002). Los estudios bibliométricos pueden estar

basados en bibliografías, servicios de indización y resúmenes, en referencias o citas, y en los directorios o catálogos colectivos de títulos de revistas.

De acuerdo con Araújo Ruiz & Arencibia Jorge (2002), los campos de aplicación más frecuentes de la bibliometría son: la selección de libros y publicaciones periódicas, la identificación de las características temáticas de la literatura, la evaluación de bibliografías y de colecciones, el estudio de la sociología de la ciencia, la determinación de revistas núcleos en determinada temática, la identificación de los países, instituciones y autores más productivos en un período determinado y la distribución según idiomas de las fuentes en una temática específica.

El análisis bibliométrico sintetiza grandes cantidades de datos bibliométricos para presentar el estado de la estructura intelectual y las tendencias emergentes de un tema o campo de investigación, mediante el estudio de las relaciones entre diferentes componentes de la investigación, como autores, países, instituciones, temas, etc. (Donthu, Kumar, Mukherjee, Pandey, & Lim, 2021). En la *Tabla 8* se presenta el procedimiento general para la realización de un análisis bibliométrico. Existen diversas técnicas para los análisis bibliométricos, dentro de las que se destacan principalmente dos:

- *Análisis de rendimiento o de desempeño:* es de naturaleza descriptiva. En este análisis se examinan las contribuciones de los constituyentes de la investigación a un campo determinado, por medio de diversas medidas, dentro de las que se destacan: el número de publicaciones, que es una indicador de productividad, el número de citas por año o por componente que es una medida de impacto e influencia (Donthu et al., 2021).

- *Mapeo científico*: esta técnica examina las relaciones entre los componentes de la investigación, es decir, las interacciones intelectuales y las conexiones estructurales entre los componentes de la investigación (Donthu et al., 2021). Para ello se analizan las citas, co-citas, acoplamiento bibliográfico, análisis de co-palabras y análisis de coautoría, y se combinan con el análisis de redes para presentar la estructura bibliométrica y la estructura intelectual del campo de investigación.

Tabla 8. *Pasos y pautas generales para realizar un análisis bibliométrico.*

	Paso	Pautas generales
1	Definir los objetivos y alcance del estudio bibliométrico	- ¿Cuáles son los objetivos y el alcance del estudio? - ¿Es el alcance del estudio lo suficientemente grande como para justificar el uso del análisis bibliométrico?
2	Elegir las técnicas para el análisis bibliométrico	¿Qué técnicas de análisis bibliométrico deben elegirse para cumplir con los objetivos y el alcance del estudio?
3	Recoger los datos para el análisis bibliométrico	- ¿Los términos de búsqueda ejemplifican el alcance del estudio? - ¿La cobertura de la base de datos es adecuada para el estudio? - ¿Los datos están libres de errores como duplicados? - ¿El conjunto de datos final cumple con los requisitos de las técnicas de análisis bibliométrico elegidas para el estudio?
4	Ejecutar el análisis bibliométrico y reportar los hallazgos	- ¿El resumen bibliométrico puede ser fácilmente entendido por los lectores? - ¿El escrito explica las peculiaridades e implicaciones del resumen bibliométrico?

Fuente: Adaptado de Donthu et al., 2021.

Para la realización de los análisis bibliométricos se suelen emplear diversas herramientas como softwares que ayudan a clasificar y visualizar la información. Dentro de ellos se destaca **bibliometrix**, que es una herramienta de código abierto para la investigación cuantitativa en cienciometría y bibliometría. Bibliometrix es una librería dentro del software abierto de Rstudio, desarrollada en el lenguaje de programación R, y dentro de análisis bibliométrico es muy útil especialmente en el mapeo científico (Bibliometrix.org, 2022).

Para facilitar el uso de bibliometrix, existe la interfaz *biblioshiny*, que es una aplicación web muy fácil de usar que no requiere de habilidades de codificación, y proporciona varias opciones para importar datos bibliográficos de bases de datos como Scopus, Web of Science, PubMede, realizar análisis bibliométricos y crear matrices de datos para co-citación, acoplamiento, análisis de colaboración científica y análisis de co-palabras (Bibliometrix.org, 2022).

5.3.7 Análisis multicriterio

El análisis multicriterio es una metodología que contribuye a la evaluación de proyectos, que se caracteriza principalmente por la diversidad de factores que se logran integrar en el proceso de evaluación y que se evalúan de forma cuantitativa. El análisis multicriterio se considera una herramienta útil para determinar el impacto de acciones a implementar porque incorpora las relaciones y conflictos existentes entre objetivos económicos, ambientales y sociales, y los diversos niveles de decisión en las evaluaciones científicas (Grajales Quintero, Serranomoya, & Von-H., 2013).

Este tipo de análisis son muy importantes principalmente en el ámbito de la toma de decisiones, donde se priorizan alternativas en base a una serie de criterios. Para llevar a cabo un análisis multicriterio, lo primero es elegir los criterios con los que se va a hacer la evaluación, luego se define la ponderación o grado de importancia de cada uno de ellos, y posteriormente se procede a validar las diferentes alternativas que se van a evaluar para la toma de decisiones usando los criterios definidos (Bernal Romero, 2018). Con este tipo de análisis no se busca necesariamente considerar la solución más óptima, sino desde una estructura analítica seleccionar la mejor o las mejores alternativas para la solución del problema en función de las preferencias de los agentes tomadores de decisiones (Grajales Quintero et al., 2013).

Existen diversos tipos de análisis multicriterio, sin embargo, para el presente trabajo se considera el proceso jerárquico analítico conocido también como AHP, el cual se emplea en la metodología.

Proceso de jerarquía analítica, AHP (Analytic Hierarchy Process)

Este tipo de análisis multicriterio fue desarrollado por Thomas L. Saaty en 1980. En proceso quien toma las decisiones proporciona evaluaciones subjetivas respecto a la importancia relativa de cada criterio, y luego indica su preferencia sobre cada una de las alternativas de decisión de acuerdo con cada criterio (Hurtado & Bruno, 2005). Así el resultado final del AHP es una jerarquización donde se priorizan las alternativas de decisión según la preferencia global. De acuerdo con Hurtado y Bruno (2005), algunas de las ventajas del AHP frente a otros métodos de análisis multicriterio son: se sustenta matemáticamente, desglosa y analiza el problema por partes, mide criterios cuantitativos y cualitativos mediante una escala común, puede incluir la participación de diferentes personas, es de fácil uso y se pueda complementar con otros métodos matemáticos.

Las preferencias se realizan comparando en pares los criterios y alternativas y calificado cuantitativamente de acuerdo con la escala fundamental del AHP o escala de Saaty (*Tabla 17*), que consta de números absolutos del uno al nueve. Según Bernal Romero (2018), esta escala se utiliza en cada una de las comparaciones pareadas respondiendo a una pregunta: ¿Cuántas veces es más dominante un elemento que otro con respecto a un determinado criterio o atributo? (p.22).

Las comparaciones pareadas son la base del AHP, con ayuda de la escala de Saaty se califica la preferencia relativa entre dos elementos. La comparaciones se hacen en matrices, y posteriormente se hace el proceso de síntesis de juicios que consta de: 1) sumar los valores en cada columna de la matriz de comparaciones pareadas, 2) dividir cada elemento de tal matriz entre el total de su columna (la matriz resultante se denomina matriz normalizada), y 3) calcular el promedio de los elementos de cada fila (Hurtado & Bruno, 2005). Esto se hace tanto con los criterios, para definir el peso de cada criterio en la decisión final, como para la calificación de alternativas por criterio. Al final se multiplica la calificación de cada alternativa según cada criterio por el peso del criterio correspondiente en una matriz final y se suman los resultados por alternativa, la alternativa con un valor total más alto es la de mayor preferencia y por ende la de mayor prioridad.

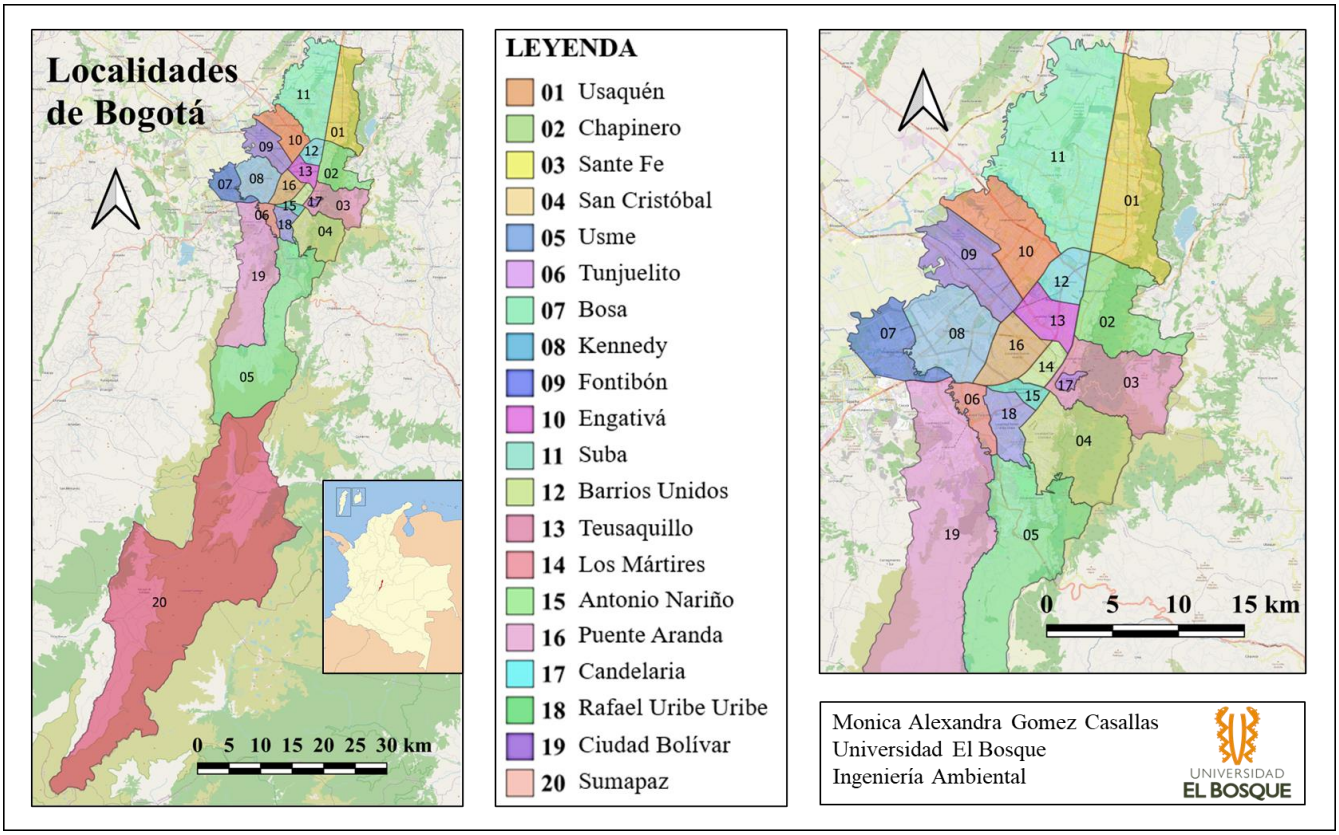
5.4 Marco geográfico

La ciudad de Bogotá es la capital de Colombia y se encuentra ubicada en el centro del país, en la región de la Sabana de Bogotá sobre la cordillera oriental de Los Andes. Tiene aproximadamente 7’743.955 habitantes (2020) y es uno de los principales centros de comercio, servicios financieros y empresariales de América Latina aportando alrededor del 25,5% del PIB del país (CIDEU, 2022).

La ciudad se encuentra a una altitud de unos 2630 m.s.n.m. y tiene un área total de 1776 km², donde unos 307 km² corresponden al área urbana (EcuRed, 2022). Parte del territorio no urbanizado se encuentra cubierto de humedales, especialmente en la localidad de Suba, lo que evidencia que parte del territorio donde se asienta la ciudad fue un lago. Así mismo, Bogotá cuenta con un sistema montañoso en el que se destacan los cerros de Monserrate (a 3152 m.s.n.m.) y Guadalupe (3250 m.s.n.m.) al oriente de la ciudad, y su río más extenso es el río Bogotá, que desde hace varias décadas presenta altos niveles de contaminación (EcuRed, 2022).

La principal herramienta de planificación con la que cuenta la ciudad es el Plan Distrital de Desarrollo, llamado “Un nuevo contrato social y ambiental para la Bogotá del Siglo XXI 2020-2024”. Este plan se enfoca en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible y cuenta con 5 propósitos, de los cuales se destacan: reverdecer a Bogotá y Bogotá-Región un modelo de movilidad multimodal, incluyente y sostenible (CIDEU, 2022). En la siguiente figura se muestra el mapa de Bogotá con sus respectivas localidades:

Figura 9. *Mapa político de Bogotá con sus respectivas localidades.*



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Gifex (2011) y La Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) de Bogotá o IDECA (2022).

Por otro lado, Suba es la localidad 11 de Bogotá y una de las más extensas con un área de aproximadamente 10.056 hectáreas. Destaca por sus amplios espacios naturales como los cerros de Suba y la Conejera, el parque Mirador de los Nevados y humedales como Juan Amarillo y Córdoba. Esta localidad también cuenta con un cabildo indígena (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2022). Así mismo, Suba tiene una población de alrededor de 1’252.675 habitantes, cuenta con 29 colegios, 5 hospitales y unos 20 centros comerciales (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2022). Esta localidad se encuentra dividida en doce Unidades de Planeación Local y una Unidad de Planeación Rural, y cuenta con 259 barrios legalizados (Secretaría Distrital de Integración Social, 2022).

La localidad de Suba es la cuarta con mayor cantidad de recicladores de oficio registrados en el RURO, con 2.442 individuos para el 14 de septiembre de 2022, lo que corresponde alrededor del 8,69% de los recicladores de Bogotá registrados en la plataforma. De estos, hay 48 que se encuentran en estado de habitante de calle y 23 en condición de discapacidad. La mayoría de la población recicladora de Suba se encuentran en estrato 2 (alrededor de 36%) y en estrato 1 (el 17%) (UAESP, 2022). En la localidad hay diversas organizaciones de recicladores, de las cuales 16 se encuentran registradas en el Registro Único de Organizaciones de Recicladores - RUOR, y se muestran en la *Tabla 9.*

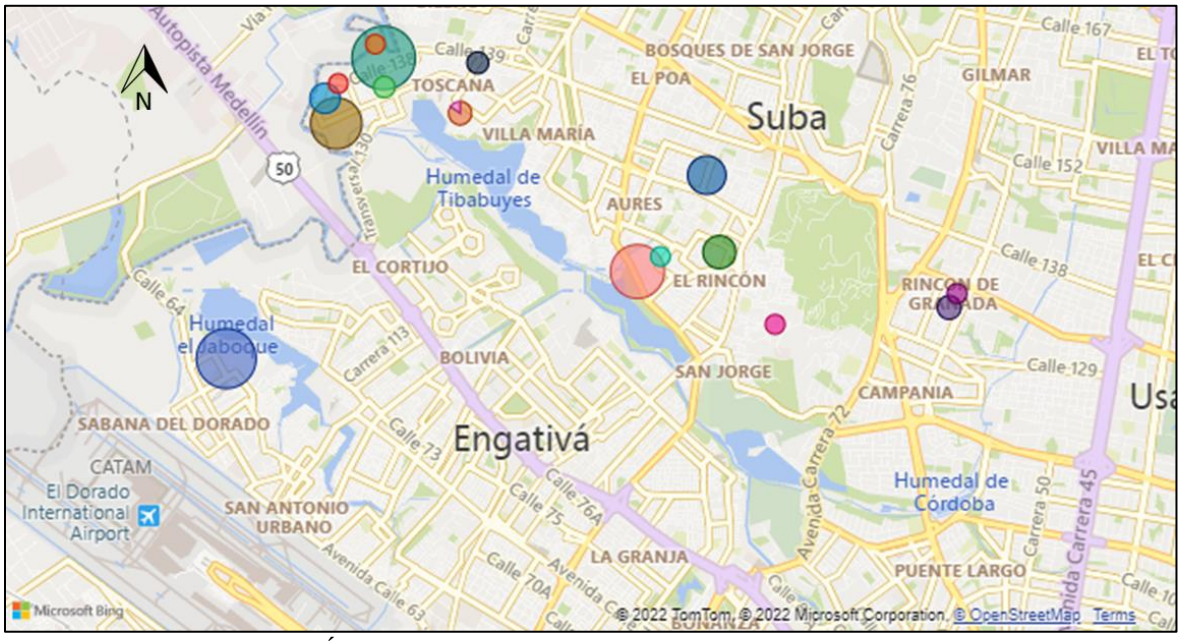
Tabla 9. *Organizaciones de recicladores de la localidad de Suba, registradas en el RUOR.*

Organización	# Socios
Asociación Colectivo Loma Verde	22
Asociación De Recicladores Amanecer Del Reciclaje	18
Asociación De Recicladores Ambientales	60
Asociación De Recicladores Ambientales - Aramb	315
Asociación De Recicladores Aqua Unidos Por El Ambiente	120
Asociación De Recicladores Bogotá V	20
Asociación De Recicladores En Crecimiento	339
Asociación De Recicladores Reciclaje Vr	38
Asociación Eco Capital Asoerc	24
Asociación Ecológica De Recicladores Eso	393
Asociación Empresarial De Familias Recuperadoras Ambientales Colombianas E.S.P.	146
Asociación Integral De Recicladores Ecológicos Esp	21
Asociación Mundial Del Reciclador Por El Planeta	196
Asociación Recuperadores Ambientalistas Colombianos	50
Red De Organizaciones De Recicladores Ambientales	9
Soluciones Ambientales Marín	42
TOTAL	1.813

Fuente: Registro Único de Organizaciones de Recicladores -RUOR (UAESP, 2022).

Estas se encuentran distribuidas principalmente en ocho barrios que son: Tibabuyes y El Rincón, con cuatro organizaciones respectivamente, Santa Rita con tres, Ibera, Lisboa, Niza, San Cayetano y Suba Berlín con una organización cada una (UAESP, 2022). En la *Figura 10* se puede ver la distribución de las organizaciones en la localidad.

Figura 10. *Ubicación y distribución de las organizaciones de recicladores de la localidad de Suba registradas en el RUOR según su número de afiliados.*



Fuente: Registro Único de Organizaciones de Recicladores - RUOR (UAESP, 2022).

5.5 Marco legal y normativo

A continuación, se presentan algunas disposiciones legales vigentes a nivel nacional, aplicables al desarrollo del presente proyecto:

Tabla 10. *Normativa nacional.*

Legislación Nacional		
Norma	**Título / Artículos**	**Descripción**
Constitución Política de Colombia	Artículo 8	Es obligación del Estado y de las personas proteger las riquezas culturales y naturales de la Nación
	Título II Capítulo III Artículo 78 al 82:	Derechos colectivos y del ambiente, su regulación y protección por parte del estado.
Ley 09 de 1979	Por la cual se dictan medidas sanitarias	Otorga disposiciones necesarias para preservar y mejorar las condiciones sanitarias ambientales para asegurar el bienestar y la salud humana.
Ley 99 de 1993	Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el sector público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA y se dictan otras disposiciones	Se dicta la estructura de las entidades encargadas de la gestión ambiental en el país.
Ley 142 de 1994	Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones.	Dicta el régimen de servicios públicos domiciliarios
Ley 2232 de 2022	Por la cual se establecen medidas tendientes a la reducción gradual de la producción y consumo de ciertos productos plásticos de un solo uso y se dictan otras disposiciones.	Se otorgan definiciones clave y se establecen medidas orientadas a la reducción de la producción y el consumo de plásticos de un solo uso en el país, su sustitución gradual, el cierre de ciclos, y otras medidas.
Decreto 2811 de 1974	Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.	Disposiciones generales sobre el aprovechamiento de los recursos y la conservación del ambiente.
Decreto 1076 de 2015	Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del sector Ambiente y Desarrollo Sostenible	Decreto compilatorio de normas ambientales.

Decreto 1077 de 2015	Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio	Decreto compilatorio de normas en materia de vivienda, ciudad y territorio. Generalidades de la gestión de residuos sólidos.
Decreto 596 de 2016	Por el cual se modifica y adiciona el Decreto 1077 de 2015 en lo relativo con el esquema de la actividad de aprovechamiento del servicio público de aseo y el régimen transitorio para la formalización de los recicladores de oficio, y se dictan otras disposiciones	Otorga lineamientos que deben cumplir los recicladores de oficio para su formalización como prestadores del servicio público de aseo, brindando reconocimiento a la labor de esta población.
Resolución 1890 de 2011	Por la cual se enuncian alternativas para la disposición final de los residuos sólidos en los municipios y distritos que dieron aplicación a lo dispuesto en las Resoluciones 1390 de 2005, 1684 de 2008, 1822 de 2009 y 1529 de 2010	Lineamentos sobre disposición final de residuos sólidos
Resolución 276 de 2016	Por la cual se reglamentan los lineamientos del esquema operativo de la actividad de aprovechamiento del servicio público de aseo y del régimen transitorio para la formalización de los recicladores de oficio acorde con lo establecido en el capítulo 5 del título 2 de la parte 3 del Decreto 1077 de 2015 adicionado por el Decreto 596 del 11 de abril de 2016	Directrices para la formalización de recicladores de oficio
Resolución 1407 de 2018	Por la cual se reglamenta la gestión ambiental de los residuos de envases y empaques de papel, cartón, plástico, vidrio, metal y se toman otras determinaciones	Plantea lineamientos que exigen a los productores que implementen un Plan de Gestión Ambiental para el manejo de envases y empaques.
Resolución 547 de 2022	Por la cual se reglamenta el Capítulo 7, del Título 2, de la Parte 3, del Libro 2, del Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio, Decreto 1077 del 26 de mayo de 2015, en lo relacionado con los criterios de elegibilidad y demás aspectos de los proyectos que pretendan acceder a los recursos del Incentivo al Aprovechamiento y Tratamiento de Residuos Sólidos	Reglamenta aspectos relacionados a la postulación de proyectos que busquen financiarse con los recursos del Incentivo al Aprovechamiento y Tratamiento de Residuos Sólidos (IAT), y procedimientos para la elección de proyectos y asignación de los recursos.

Fuente: elaboración propia.

También se considera normativa referente a la actividad de aprovechamiento de residuos sólidos en Colombia, como:

- Artículo 14 La ley 142 de 1994: el aprovechamiento de residuos se considera como una de las actividades complementarias del servicio público de aseo.

- La Corte Constitucional se ha pronunciado sobre la actividad del reciclaje de oficio en diversas sentencias y Autos. Se destacan: el Auto 268 de 2010, donde esta población se considera como de especial protección, el Auto 183 de 2011 y el Auto 275 de 2011, en el que se reconoce al reciclador como prestador del servicio de aseo, y por ende se debe asegurar su participación y remuneración dentro de la actividad de aprovechamiento.

- Decreto 2981 de 2013: el Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio reglamenta la actividad de aprovechamiento dentro del servicio público de aseo. Que comprende la recolección de residuos aprovechables, el transporte selectivo hasta la estación de clasificación y el aprovechamiento.

- Resolución 754 de 2014: expedida por el ministerio de vivienda, señala la formulación, implementación, evaluación, seguimiento, control y actualización de los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS). El cual debe promover el aprovechamiento de residuos sólidos, contar con programas de inclusión de recicladores de oficio y estrategias de educación.

- Resolución 720 de 2015 de la Comisión de Regulación de Agua Potable –CRA: se reglamenta la remuneración a las aprovechamiento y las desarrolladas por recicladores, como una actividad complementaria del servicio público de aseo, desde el punto de vista tarifario.

En términos generales, para el desarrollo de la presente monografía se considera la normativa de residuos sólidos, especialmente la referente a su gestión y al servicio público de aseo. Así como también políticas, estrategias y planes como: la Estrategia Nacional de Economía Circular o ENEC, el plan nacional de plásticos, instrumentos de gestión como el PGIRS, documentos CONPES, como el CONPES 3874 que dicta la Política Nacional Para la Gestión Integral de Residuos Sólidos, entre otros.

Por otro lado, a continuación, se presentan algunas normativas a nivel internacional que pueden contribuir al desarrollo del presente proyecto:

Tabla 11. *Normativa internacional.*

Legislación Internacional		
Norma	**País**	**Descripción**
Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR)	México	Publicada por primera vez en 2003, ha sido reformada posteriormente Tiene como objetivo mejorar la gestión de la basura y los materiales sólidos.
Ley Marco para la Gestión de Residuos, la Responsabilidad Extendida del Productor y Fomento al Reciclaje. Ley N°20.920	Chile	Esta ley tiene como objetivo disminuir la generación de residuos y fomentar su valorización, a partir de la responsabilidad extendida del productor y la gestión de residuos, buscando proteger la salud de las personas y el ambiente.
Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular	España	Esta ley busca prevenir y reducir la generación de residuos, así como de los impactos adversos de su generación y gestión. También se enfoca en la reducción del impacto global generado por el uso ineficiente de los recursos.

Serie de Normas ISO 14000	-	Conjunto de normas que abordan temáticas ambientales, de productos y organizaciones. Dentro de estas, se destaca la Norma ISO 14001, que funciona como estándar internacional en cuanto a la gestión ambiental.

Fuente: elaboración propia.

5.6 Marco institucional

A continuación, se presentan algunas instituciones y organizaciones que de manera directa o indirecta inciden en el desarrollos del presente proyecto de investigación:

ENDA Colombia

Su nombre viene de las siglas en inglés "Environment and Development Action", lo que traduce Acción para el Medio Ambiente y el Desarrollo. Así pues, ENDA América Latina – Colombia es una organización no gubernamental trabaja en la ciudad de Bogotá, desde 1983. Pertenece a la red ENDA Tercer Mundo, con sede principal en Senegal (ENDA AL- Colombia, 2017).

ENDA AL-Colombia desarrolla actividades en pro de la construcción de ciudades ambiental y socialmente sustentables, democráticas, no violentas, plurales y equitativas en términos económicos, culturales y de género (ENDA AL- Colombia, 2017). Por ello se dedica a la Gestión Ambiental Urbana y de acuerdo con la misma organización, ENDA:

> impulsa el desarrollo humano individual y colectivo de sectores populares urbanos, su consolidación organizativa, su articulación con otros actores y su incidencia en políticas públicas como protagonistas de ciudad-región, enmarcada en la cooperación solidaria Sur-Sur y la creación de nuevas formas de relación Sur-Norte. (ENDA AL- Colombia, 2017)

El presente proyecto se trabajará dentro del macro proyecto que ha venido adelantando ENDA con población recicladora, principalmente en la localidad de Suba en Bogotá, donde esta organización ha llevado cabo acciones para visibilizar el trabajo de recicladores como seres humanos, como: formación técnica y en temáticas como políticas públicas y derechos humanos, caracterización geográfica, diagnósticos para conocer su situación y actividades orientadas a que la población recicladora pueda cumplir con el decreto 596 de 2016, y puedan formalizarse como prestadores del servicio público de aseo.

Secretaría Distrital de Ambiente

La Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) es una autoridad perteneciente a la administración central de la ciudad de Bogotá, que se encarga de promover, orientar y regular la sustentabilidad ambiental en el perímetro urbano del Distrito Capital; también es la entidad que rige la Política Ambiental Distrital (Secretaría Distrital de Ambiente, 2022).

Como la principal autoridad ambiental de Bogotá, la SDA "propende por el desarrollo sostenible de la ciudad, formulando, promoviendo y orientando políticas, planes y programas que permitan la conservación, protección y recuperación del ambiente" (Secretaría Distrital de Ambiente, 2022). Dentro de las principales funciones de esta entidad se encuentran:

- Formular de manera participativa la política ambiental del Distrito Capital.

- Coordinar y liderar el SIAC (Sistema Ambiental del Distrito Capital).
- Realizar el control de: vertimientos y emisiones contaminantes, y disposición de desechos sólidos, residuos peligrosos y residuos tóxicos.
- Promover y desarrollar programas educativos, recreativos e investigativos en temas ecológicos, botánicos, faunísticos, ambientales y de conservación de los recursos naturales.

En cuanto al aporte a este proyecto, esta entidad otorga información puntual e importante para la comprensión de la problemática de la gestión de los residuos y la población recicladora, así como cartografía útil como referencia para el marco geográfico.

UAESP

La Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos, fue creada por El Concejo de Bogotá, mediante el artículo 113 del Acuerdo número 257 del 30 de noviembre de 2006, a partir de la Unidad Ejecutiva de Servicios Públicos (Colnodo, 2018). Esta entidad está organizada como una Unidad Administrativa Especial perteneciente al orden distrital del Sector Descentralizado por Servicios, es de naturaleza técnica y especializada, cuenta con personería jurídica, autonomía administrativa y presupuestal y con patrimonio propio; así mismo, se encuentra adscrita a la Secretaría Distrital del Hábitat (Colnodo, 2018).

Algunos de sus objetivos y funciones son (UAESP, 2011):

- El fortalecimiento institucional, buscando incrementar la efectividad de la Gestión Pública de la UAESP en el marco del Modelo Integrado de Planeación y Gestión. Esto, a partir de la innovación institucional, el cambio tecnológico, y la toma de decisiones articulada a un sistema integrado de información.
- Fomento de una cultura de participación ciudadana incidente en la UAESP, a través de una comunicación transparente.
- Economía circular en el manejo integral de residuos.
- Promover cambios culturales en la gestión de residuos, respecto a los conocimientos, actitudes, valores y las prácticas respecto al proceso, así como también de los actores y los materiales en la gestión de residuos. Esto, desde el enfoque de Cultura Ciudadana.
- Gestión de alumbrado público: mejorar las condiciones de iluminación del espacio público, disminuir los costos ambientales y propiciar el ahorro en el consumo energético.

Esta entidad brinda al presente proyecto lineamientos generales e información relevante sobre la gestión de residuos sólidos y la prestación del servicio público de aseo, para tener en cuenta para el desarrollo del mismo.

Universidad El Bosque

Es una universidad privada cuya sede principal se encuentra en la localidad de Usaquén en Bogotá. Tiene como objetivo consolidarse como una universidad de formación multidisciplinaria, con enfoque en la salud y la calidad de vida, a partir de su desarrollo en formación, investigación, transferencia y

servicio (Universidad El Bosque, 2022). La Universidad El Bosque tiene como misión institucional "lograr la generación y pertinencia del conocimiento, atendiendo a las necesidades y retos que plantea la sociedad" (Universidad El Bosque, 2022).

Acoplásticos

Es una entidad gremial colombiana sin ánimo de lucro, fundada en 1961. Agrupa y representa a las empresas e industrias del plástico, incluyendo también a las del caucho, pinturas y tintas, fibras, petroquímica y afines (Acoplásticos, 2022). Las actividades de Acoplásticos se extienden por todo el país, y su sede principal se encuentra en Bogotá, y sus principales objetivos son: promover el desarrollo sostenible del sector, contribuir a la gestión empresarial de sus afiliados, cooperar en la concertación entre los afiliados y ser vocero del sector ante el gobierno, la sociedad y otras entidades (Acoplásticos, 2022).

De acuerdo con Acoplásticos (2022), esta entidad cuenta principalmente con dos tipos de afiliados o socios:

- Socios Activos: empresas vinculadas que se dedican a la producción o a la transformación de materias primas plásticas, materiales petroquímicos, elastómeros, fibras pinturas y tintas.
- Socios Adherentes: personas naturales o jurídicas que suministran localmente de bienes y servicios requeridos por el sector, y otros agentes económicos cuya actividad se relacione.

Acoplásticos desarrolla diversos estudios, encuestas e informes sobre el plástico que aportan el desarrollo del presente proyecto.

Cámara ambiental del plástico

Se conformó en el año 2016, como el gremio representativo de toda la industria plástica de Colombia, y su misión es "asegurar la sostenibilidad de las empresas del sector plástico y promover las mejores prácticas comerciales y ambientales" (Cámara Ambiental del Plástico, 2020). Esta entidad busca incentivar la gestión del reciclaje y recolección de plástico.

Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios

Conocida también como Superservicios, es una entidad estatal de rango constitucional de acuerdo con el artículo 370 de la Constitución Política de 1991, que ejerce funciones de inspección, vigilancia y control sobre las entidades y empresas prestadoras de servicios públicos como: acueducto, alcantarillado, aseo, energía y gas (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2022). Tiene como misión promover y proteger los derechos y deberes de los usuarios y los prestadores de los servicios públicos domiciliarios, así como también garantizar la prestación de estos de manera sostenible y con calidad (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2022).

En la Ley 142 de 1994, que trata sobre el régimen de los servicios públicos domiciliarios en Colombia, se señala la creación legal, naturaleza, principios y funciones de la Superintendencia, la cual está adscrita al Departamento Nacional de Planeación, y cuenta con autonomía administrativa y patrimonial y personería jurídica (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2022). Para el presente proyecto se tienen en cuenta los lineamientos de la Superservicios, especialmente los que conciernen al servicio público de aseo.

Otros actores institucionales relevantes

Dentro del sistema de economía circular y el panorama del reciclaje en Colombia y en Bogotá existen otras instituciones, organizaciones y empresas que se tuvieron en cuenta para el desarrollo de la presente monografía, como lo son:

- *Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR:* es la máxima autoridad ambiental del departamento; se encarga de ejecutar políticas, planes, programas y proyectos ambientales, orientados a la construcción de tejido social y el desarrollo sostenible (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, 2022).

- *Asociación Nacional de Empresarios de Colombia – ANDI:* es la agremiación empresarial más importante de Colombia. Integrada por empresas de diversos sectores como el de alimentos, comercial, industrial, financiero, agroindustrial, de servicios, entre otros. Su objetivo es "difundir y propiciar los principios políticos, económicos y sociales de un sano sistema de libre empresa" (ANDI, 2022).

- *CEMPRE:* Compromiso empresarial para el reciclaje. Es una organización sin ánimo de lucro que desarrolla acciones de economía circular, articulando actores como: el Gobierno Nacional, el sector privado, los gremios, los esquemas municipales, las organizaciones de recicladores de oficio, los transformadores y las comunidades (CEMPRE, 2022).. Sus asociados son empresas que vienen incorporando los procesos de sostenibilidad la economía circular como herramienta y modelo de negocio, dentro de las que se encuentran: Alpina, Empacor, Carvaja empaques, Essentia, Tetra Pak, Nestlé, Natura, Postobón, Coca-Cola. Familia, ENKA y Bavaria.

- *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible – MADS*: es la entidad pública encargada de establecer la política ambiental a nivel nacional y promover la conservación, protección, recuperación, y ordenamiento de los recursos naturales renovables, así como garantizar su buen manejo y aprovechamiento, para alcanzar el desarrollo sostenible y garantizar el derecho de los colombianos a un ambiente sano (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022).

- *Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio – MVCT:* es la entidad pública encargada de promover el desarrollo territorial y urbano planificado del país, trabajando en la disminución del déficit en vivienda urbana, agua potable y saneamiento básico, para mejorar la calidad de vida de la población (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, 2022).

- *Departamento Nacional de Planeación – DNP:* es la entidad nacional encargada de coordinar, articular y apoyar la planificación del país, ya sea a corto, mediano o largo plazo. Así mismo, orienta políticas públicas y la priorización de los recursos de inversión (Departamento Nacional de Planeación, 2022).

- *Micro, pequeñas y medianas empresas de reciclaje:* unidades productivas que realizan labores de pre-transformación y transformación de materiales recuperados para obtener materia prima con un valor agregado o productos nuevos compuestos de este tipo de materiales, ejerciendo actividades de carácter industrial (UAESP, 2018).

- *Centros de acopio:* lugares cerrados de pequeña escala, que realizan la recepción, selección, acopio transitorio y comercialización de material reciclable inorgánico sin ningún tipo de transformación (UAESP, 2018).

- *Bodegas:* lugares cerrados y cubiertos, que reciben materiales provenientes de los centros de acopio y de otras fuentes de suministro, mediante convenios y acuerdos comerciales. Realizan procesos de almacenamiento, pre-transformación y comercialización de materiales (UAESP, 2018).

6. Metodología

6.1 Enfoque de la investigación

El presente estudio tiene un *enfoque mixto*, porque, aunque se describen las tecnologías de transformación de PET y se hace una revisión de bibliografía de manera cualitativa, también se emplean métodos cuantitativos como la bibliometría y el análisis multicriterio, con el fin de enriquecer la investigación y facilitar el análisis de información. De acuerdo con Otero Ortega (2018), los estudios de carácter mixto surgen de la necesidad de afrontar la complejidad de los problemas de investigación enfocándolos de manera holística, usando técnicas tanto cuantitativas como cualitativas, de forma que se emplean las fortalezas de ambos enfoques.

El proceso de investigación mixto representa un proceso sistemático, empírico y crítico, donde se pueden combinar la visión objetiva de la investigación cuantitativa y la visión subjetiva de la investigación cualitativa para dar respuesta a problemas (Otero Ortega, 2018, pág. 19). De acuerdo con (Hernández Sampieri, 2018), este enfoque implica la recolección, análisis, mezcla, conversión e integración de datos cualitativos y cuantitativos, así mismo, ofrece una perspectiva más amplia, mayor solidez y rigor, y una mayor exploración y explotación de los datos.

6.2 Alcance del proyecto

El presente proyecto es un *estudio no experimental de alcance descriptivo*. Este tipo de estudios describen o reseñan las características o rasgos del objeto de estudio, y algunas de sus características son (Martínez Olmedo, 2013):

- Aborda las características fundamentales del objeto de estudio seleccionadas.
- Describe las partes, categorías o clases que existen del objeto de estudio.
- Muestra, narra, reseña o identifica hechos, situaciones, rasgos, características del objeto de estudio.
- En este tipo de estudios se diseñan productos, modelos, prototipos, guías, o similares.
- Estos estudios pueden ser la base de otros tipos de investigación más compleja.
- No plantean hipótesis.
- Las principales fuentes de información en las que se basan son: encuestas, entrevistas, observación y revisión documental.

6.3 Método

El presente estudio buscó en esencia recopilar información sobre tecnologías para el reciclaje de plástico PET que pueda ser útil a la organización ENDA Colombia, por ende, el principal método empleado es el **método sintético.** Tal y como su nombre lo indica, este tipo de método tiene como objetivo lograr una síntesis de lo investigado, por ello es de carácter progresivo y "permite comprender la esencia y la naturaleza del fenómeno estudiado" (Pascuas Rengifo, 2014).

De igual manera, en menor medida se empleó el **método analítico,** en el cual se estudian y examinan las partes de un todo y sus relaciones, con ello se busca observar la naturaleza y los efectos del fenómeno, para su mejor comprensión y explicación (Pascuas Rengifo, 2014).

Así, mediante el método sintético se buscó recopilar y compendiar información, y con el método analítico se buscó comprender y estudiar la pertinencia de la información recopilada.

6.4 Metodología general

El proyecto es de carácter de revisión y teórico, buscando desarrollar una herramienta informativa sobre las tecnologías de transformación de materiales reciclables. En este sentido, las principales técnicas empleadas son: análisis documental y la revisión bibliográfica. Siendo los principales instrumentos la bibliografía: libros, artículos científicos y bases de datos. A continuación, se presenta de manera general los aspectos metodológicos más importantes del presente proyecto:

Tabla 12. *Metodología general de trabajo.*

Objetivo General	Identificar distintas tecnologías de bajo costo para la transformación de plástico PET orientadas hacia la optimización de los procesos del reciclaje de oficio, de la localidad de Suba en Bogotá, apoyados por ENDA Colombia.			
Objetivos específicos	**Alcance**	**Actividades**	**Técnicas**	**Instrumentos**
Analizar el panorama investigativo actual, tanto global como local, sobre las tecnologías existentes para la transformación y reciclaje de plástico PET.	Conocer el estado de la investigación sobre el reciclaje de PET, e identificar las principales tecnologías empleadas para ello.	- Establecer ecuaciones de búsqueda. - Recopilar información de bases de datos. - Extraer datos. - Reconocer tendencias investigativas globales sobre reciclaje de PET. - Describir las principales tecnologías para transformar el PET a nivel local - Analizar la información recopilada.	- Análisis documental. - Revisión bibliográfica. - Estudio bibliométrico.	- Bases de datos. - Tesauros. - Programas informáticos para el manejo de datos: Excel. - Software R y librería Bibliometrix.

Priorizar las tecnologías más acordes al contexto del reciclaje en Suba para la transformación del plástico PET, mediante un análisis multicriterio.	Seleccionar las tecnologías que se consideren más acordes de ser implementadas, según la aplicación de criterios	- Selección de los criterios. - Obtención de los Coeficientes de Importancia Relativa (CIR). - Ordenar los criterios según su porcentaje de peso en la decisión final. - Escoger las opciones de decisión o las alternativas a priorizar. - Determinar los Coeficientes de Selección Ambiental (CSA). - Analizar la matriz final donde se relacionan los CSA y los CIR y se definen las alternativas óptimas.	- Análisis documental. - Revisión bibliográfica. - Método AHP para el análisis multicriterio.	- Bases de datos - Criterios e indicadores - Matrices de evaluación
Plantear una hoja de ruta para la implementación de un proyecto piloto de una de las tecnologías priorizadas.	Paso a paso de la metodología de implementación de una tecnología y sus requerimientos.	- Investigar sobre la tecnología. - Listar recursos y herramientas que requiere. - Hacer un diagrama de flujo paso a paso implementación. - Plantear un presupuesto general.	- Análisis documental. - Revisión bibliográfica.	Bibliografía: libros, artículos científicos y bases de datos

Fuente: elaboración propia.

6.5 Metodología por objetivos

A continuación, se presenta en términos generales la metodología por objetivos específicos:

6.5.1 Analizar el panorama investigativo actual, tanto global como local, sobre las tecnologías existentes para la transformación y reciclaje de plástico PET

Se empleó una metodología basada en el estudio *Análisis Cuantitativo de las Producciones Científicas en Colombia y en los Países Líderes en Investigación, Sobre el Desarrollo de Nuevas Tecnologías Aplicadas a la Prestación del Servicio de Agua Potable*, de Gutiérrez Ávila (2021) en el que se hace un análisis bibliométrico de información de diversos productos investigativos. Se realizó lo siguiente:

1. Plantear la búsqueda y recuperación de información:

- Se definen las palabras claves y se hace una normalización de términos mediante el uso de tesauros, tal y cómo se muestra a continuación:
    - Tesauro de la UNESCO

Tabla 13. *Normalización de términos con el tesauro de la UNESCO.*

Palabra clave	Término preferido o concepto genérico	Términos en inglés	Conceptos relacionados
Plásticos	Polímeros	- Plastics - Synthetic resins - Plastic products	- Material compuesto - Material nuevo - Producto químico

Reciclaje	Tratamiento de desechos	- Waste treatment - Waste collection - Waste recycling - Waste handling	- Conservación de recursos - Desperdicio - Recuperación calorífica

Fuente: elaboración propia.

- Tesauro Ambiental Para Colombia

Tabla 14 . *Normalización de términos con el Tesauro Ambiental para Colombia.*

Término	Nota de alcance (NA)	Término más amplio (TA)	Términos relacionado (TR)
Plásticos	Materiales poliméricos orgánicos que pueden deformarse hasta conseguir una forma deseada por medio de extrusión, moldeo o hilado.	Resinas	- Residuos no biodegradables - Contaminación industrial - Caucho artificial
Reciclaje	Reaprovechamiento, en el proceso productivo, de materiales ya utilizados.	Saneamiento básico	- Servicios públicos - Gestión integral de residuos
Aprovechamiento de residuos	Producción, extracción, transformación de productos, a partir de los residuos sólidos, líquidos o gaseosos.	Recursos naturales renovables	- Reciclaje - Energías renovables
Residuos aprovechables	Aquellos residuos sólidos o líquidos que pueden ser reutilizados o transformados incluyéndolos al proceso económico con valor comercial.	Saneamiento básico	Gestión integral de residuos

Fuente: elaboración propia.

- Tesauro de Engineering Village

Tabla 15. *Normalización de términos con el tesauro de Engineering Village.*

Palabra clave	Términos sugeridos	
Reciclaje	-Plastic recycling -Recycling	-Eco-design -Energy conservation
Plástico	-Plastic building materials -Plastic bottles -Plastic films	-Plastic castings -Plastic deformation
PET /PETP	-Polyethylene terephthalates	- Polyethylene

Fuente: elaboración propia.

- Se plantean las ecuaciones de búsqueda usando también operadores booleanos. Algunas ecuaciones empleadas fueron:

Tabla 16. *Ecuaciones de búsqueda empleadas para la recuperación de información.*

Ecuaciones de búsqueda
Plástico AND reciclaje
“Plástico PET” AND reciclaje
Plástico PET AND Transformación
Reciclaje AND “botellas de plástico”
“Polyethylene terephthalates” AND recycling
“Plastic bottles” AND transformation
“Plastic recycling”

Fuente: elaboración propia.

2. Estimar las tendencias investigativas globales sobre el reciclaje de plástico PET:

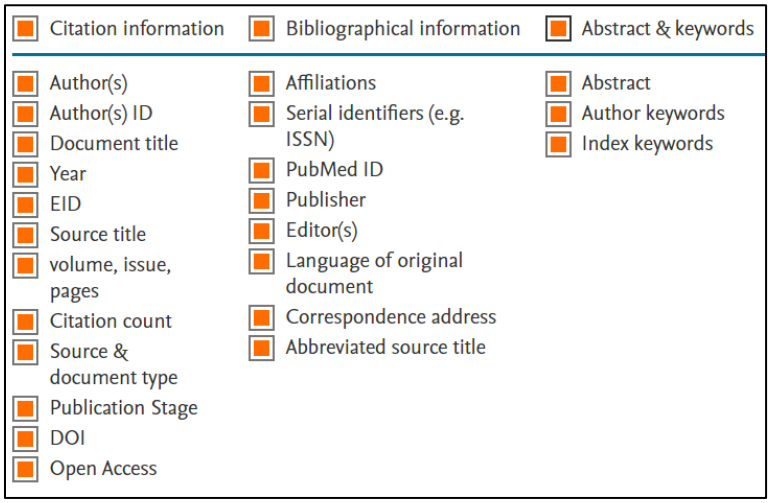
- Se hizo una recopilación de publicaciones internacionales a través de la base de datos Scopus. Esta es una base de datos bibliográfica de resúmenes y citas que cuenta con una amplia cobertura, abarcando más de 240 disciplinas. Scopus indexa contenido examinado y seleccionado por una junta de revisión independiente de expertos en sus campos, además, genera resultados de citas, perfiles de investigadores y métricas, además posee diversas herramientas analíticas (Elsevier, 2022). Por lo que es una base de datos óptima para el análisis bibliométrico:

  - Se usó la ecuación de búsqueda en inglés para mayor alcance de búsqueda: “Polyethylene terephthalates” AND recycling, puesto que se considera la más acorde con la temática de interés.

  - Se filtró la búsqueda entre los años 2015 y 2021, con el fin de obtener información reciente de los últimos 7 años terminados, por ello no se incluye el año 2022. De igual manera, sólo se consideraron artículos científicos, puesto que se buscó conocer el panorama de la investigación en el tema. En total, se recopilaron 1.040 documentos.

  - Se extrajo información relevante como: año, autor, título, fuente, tipo de publicación, institución o revista, frecuencia de citación, DOI, entre otras que se muestran en la ***¡Error! No se encuentra e l origen de la referencia.****Figura 11*. La información obtenida se descarga en formato BibTex.

Figura 11. *Información extraída de la base de datos para el análisis bibliométrico.*



Fuente: tomado de la base de datos Scopus.

- La información recopilada ingresó a la interfaz web Bibliometrix, a la cual se ingresa mediante el software Rstudio. Una vez ingresada la información, esta es procesada por la herramienta y se obtienen métricas a manera de gráficas como: producción científica anual, fuentes más relevantes, impacto local de fuentes, autores más relevantes, impacto local de autores, afiliaciones más relevantes, producción científica por país y los documentos más citados a nivel mundial. Estas métricas se analizaron con el fin de comprender el panorama investigativo del reciclaje de PET a nivel mundial.

- Los cinco artículos más citados a nivel mundial se revisaron y se resumieron, con el fin de conocer los avances científicos más relevantes en el reciclaje de plástico.

3. Conocer las principales tecnologías para transformación de plástico PET:

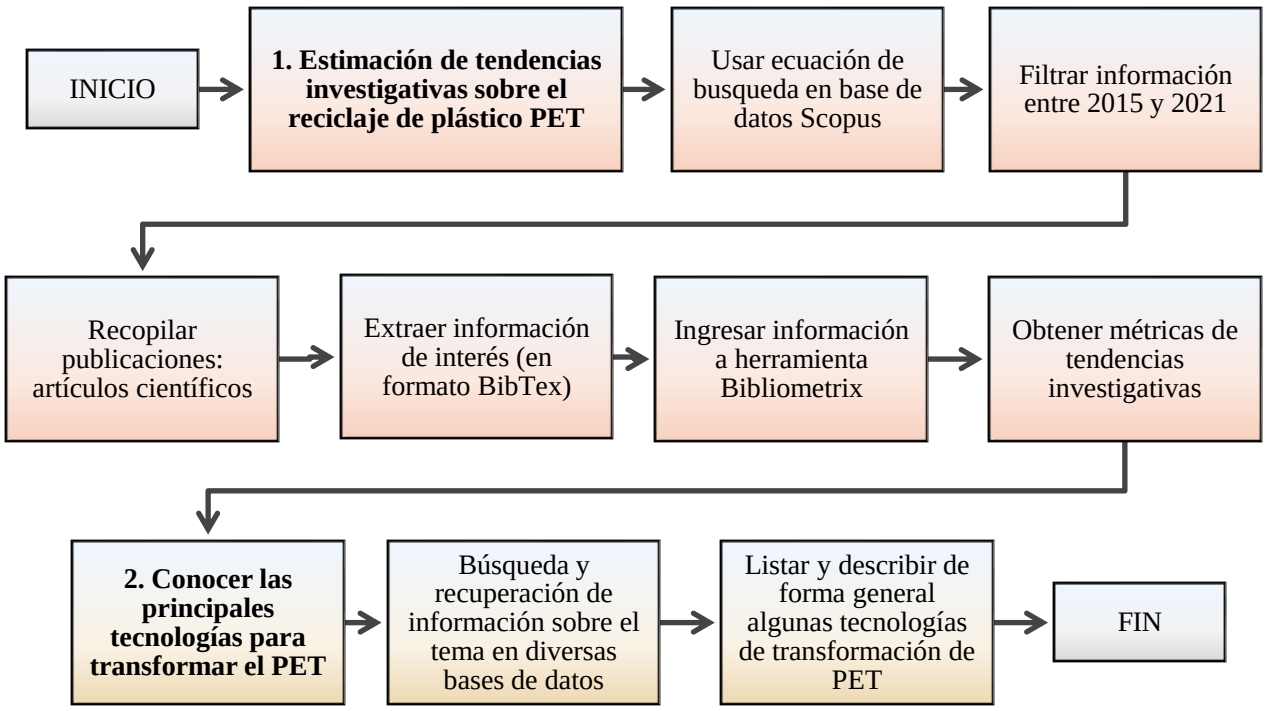
- Usando las demás ecuaciones definidas previamente se realizó una revisión bibliográfica en diferentes bases de datos como Engineering Village, Scopus, Science Direct y Springer Link y buscadores como Google Académico y se recolectó información sobre métodos para la transformación o valorización de plástico PET. Para ello:

  - Se aplicaron filtros temporales para sólo obtener información entre los años 2012 y 2022.

  - Se describieron los métodos o tecnologías para la valorización del plástico PET más empleados.

A continuación, se presenta de manera gráfica las actividades para desarrollar del primer objetivo:

Figura 12. *Diagrama de flujo de la metodología seguida para el desarrollo del primer objetivo.*



Fuente: elaboración propia.

6.5.2 Priorizar las tecnologías más acordes al contexto del reciclaje en Suba para la transformación del plástico PET, mediante un análisis multicriterio

Para este objetivo se hizo una comparación de las alternativas tanto para la transformación como para la valorización de plástico PET, por medio de la metodología de Análisis Multicriterio (AMC) dentro de la dimensión ecológica y económica, otorgándole un rango de valores a cada una de las alternativas para determinar cuál de ellas tiene mayor viabilidad en cuanto a la puesta en marcha de acuerdo con el contexto de la recuperación de estos residuos y el reciclaje en la localidad de Suba en Bogotá.

Para ello se empleó una metodología basada en Machado, G. F. (2005) en el *Estudio de impacto ambiental para la construcción y funcionamiento de la planta de agua potable del sistema Culebrillas* y el trabajo de Cortés Mesa & Níelsen Avelta (2019) titulado *Aprovechamiento de aceite lubricante automotriz usado, como nueva línea de negocio en la empresa EMIR S.A E.S.P.*, donde se aplica un análisis multicriterio realizado con un método denominado "método escala y peso", el cual se fundamenta en el Proceso de Jerarquía Analítica o AHP. Para ello realiza lo siguiente:

1. Se **establecieron los criterios** que se utilizaron para calificar y comparar las tecnologías o alternativas, para ordenarlos de acuerdo con su porcentaje de peso y aplicarlos. Los criterios se tomaron dentro de las dimensiones económica, ecológica y social.

2. Se **definió el peso de cada criterio** a partir de la obtención de los Coeficientes de importancia Relativa (CIR), para ello, en una matriz se hizo la ponderación de valores asignados a cada criterio que indican la relación entre estos mediante comparaciones pareadas, con base a la escala de Saaty (*Tabla 17*).

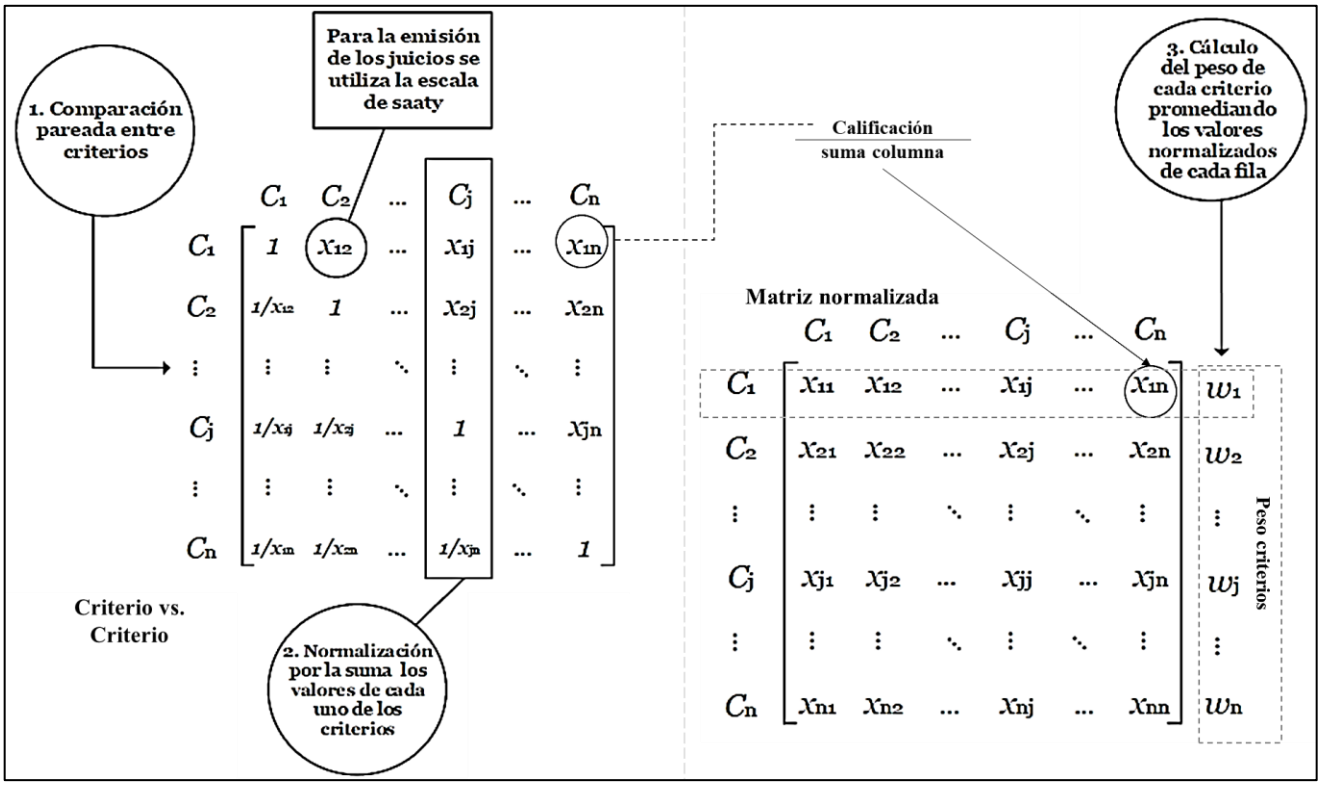
Tabla 17. *Escala de Saaty de preferencias*.

Planteamiento verbal de la preferencia	Calificación numérica
Extremadamente preferible	9
Entre muy fuerte y extremadamente preferible	8
Muy fuertemente preferible	7
Entre fuertemente preferible y muy fuertemente preferible	6
Fuertemente preferible	5
Entre moderadamente preferible y fuertemente preferible	4
Moderadamente preferible	3
Entre igualmente preferible y moderadamente preferible	2
Igualmente preferible	1

Fuente: Adaptado de Hurtado & Bruno, 2005.

La matriz con la ponderación se normaliza multiplicando cada valor de cada columna por la suma de la columna correspondiente. En la siguiente figura se muestra de manera gráfica el proceso y los cálculos para la ponderación de los criterios de acuerdo con el método AHP:

Figura 13. *Proceso de ponderación de criterios para el análisis multicriterio AHP.*



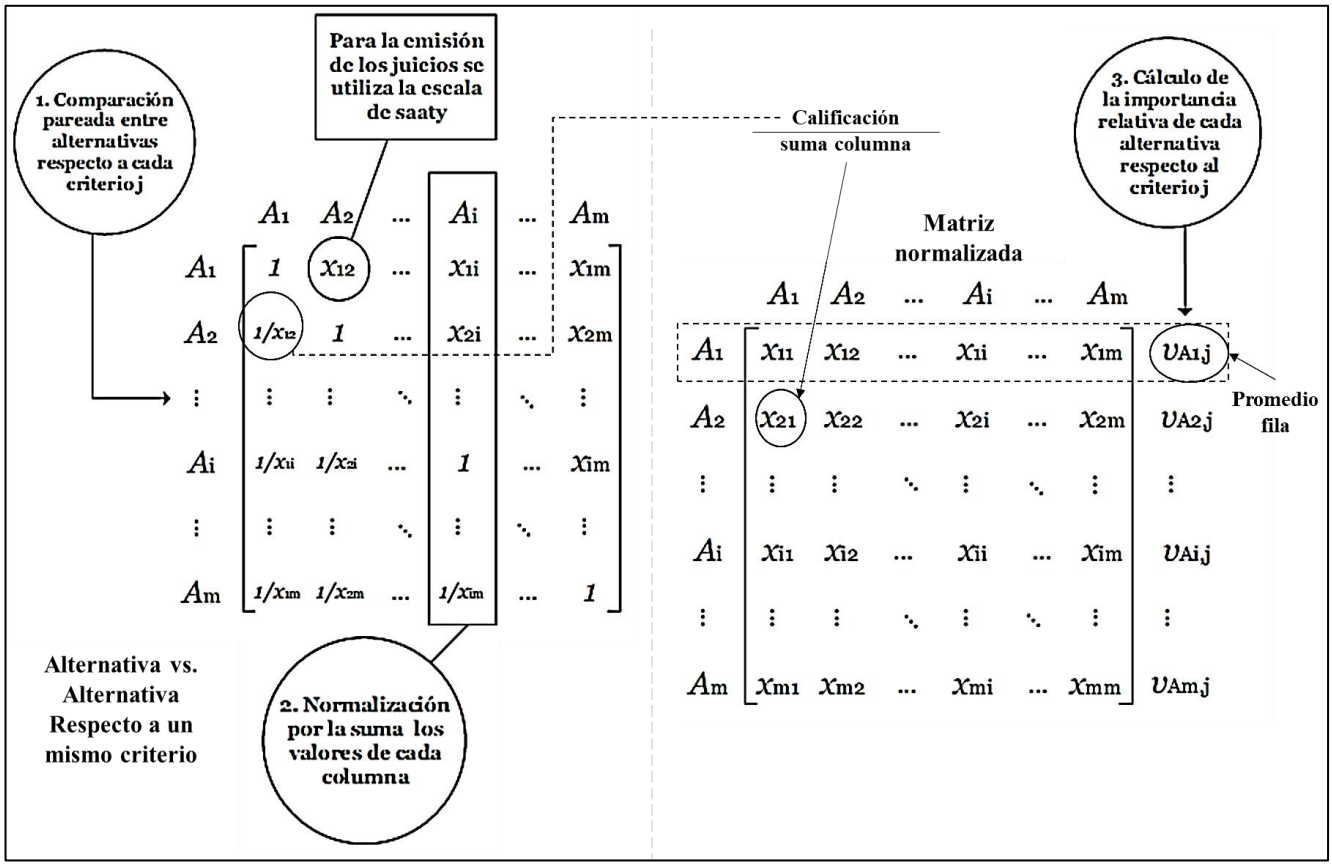
Fuente: adaptado de Bernal Romero, 2018.

3. Se **ordenaron los criterios según su porcentaje de peso,** es decir de mayor a menor según su valor de CIR, de manera que un mayor valor implica que el criterio tiene un mayor peso en la decisión final.

4. Se **escogieron las opciones de decisión** o las alternativas a priorizar. Así, se identificó el desempeño de cada una de las opciones acorde con los criterios de evaluación. Para ello se empleó información secundaria.

5. Se **determinaron los Coeficientes de Selección Ambiental (CSA),** es decir, según cada criterio, se procedió a calificar cada una de las alternativas en una matriz, comparando las medidas de desempeño de cada alternativa con base a los criterios previamente definidos. Usando el proceso AHP, se valora numéricamente la importancia relativa de cada alternativa por comparación pareada con otra alternativa, en función de cada uno de los criterios a considerar, estos juicios son sintetizados para determinar qué alternativas tienen mayor prioridad. Este proceso se muestra en la siguiente figura:

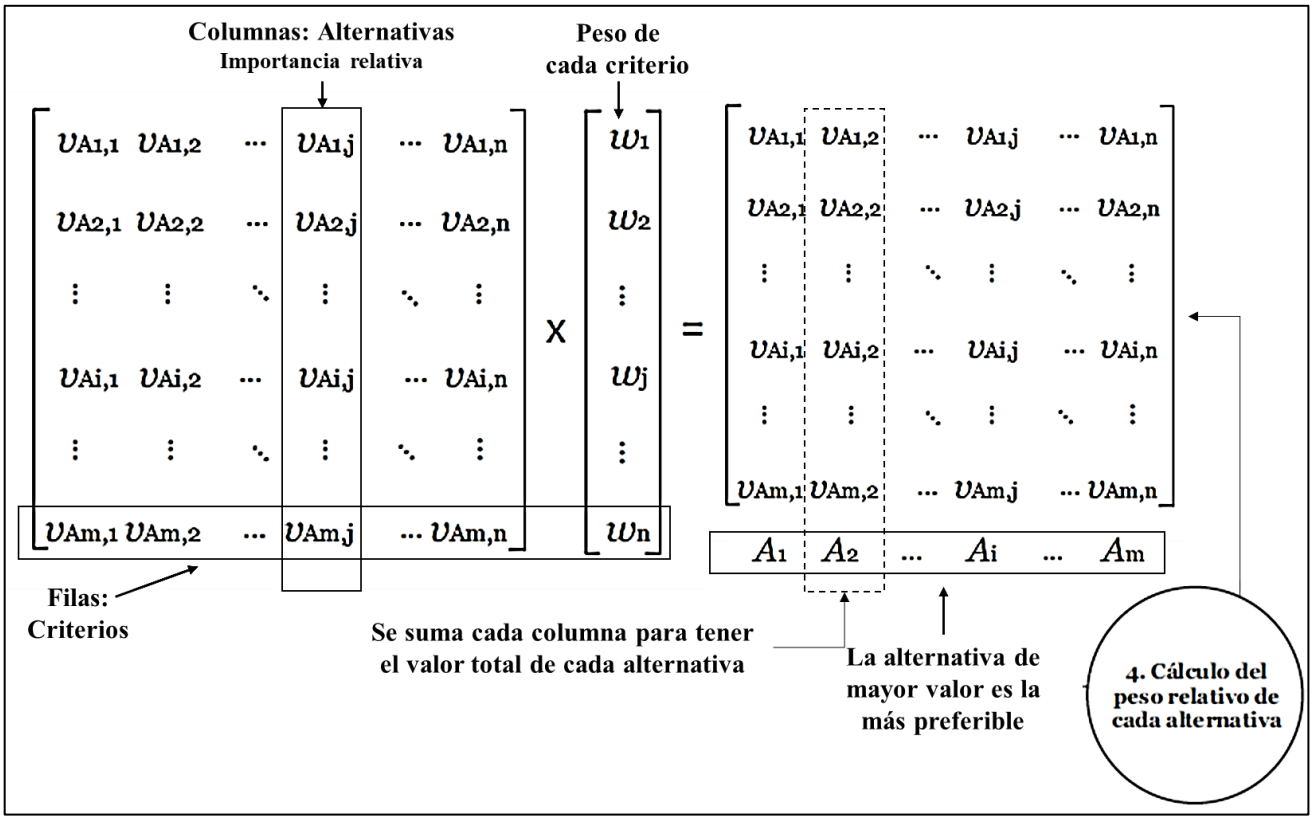
Figura 14. *Proceso para evaluar alternativas por criterio según análisis multicriterio AHP.*



Fuente: adaptado de Bernal Romero, 2018.

6. Se **analizó la matriz final donde se relacionan los CSA y los CIR**. En la matriz global se colocaron los valores previamente obtenidos de cada alternativa de acuerdo con cada uno de los criterios (CSA), y se multiplicó el CSA por el CIR de cada criterio por alternativa, para finalmente sumar todos los valores por alternativa u opción. Entre mayor sea este valor total, más preferible se considera la alternativa. Los procesos de la matriz final de decisión se muestran en la siguiente figura:

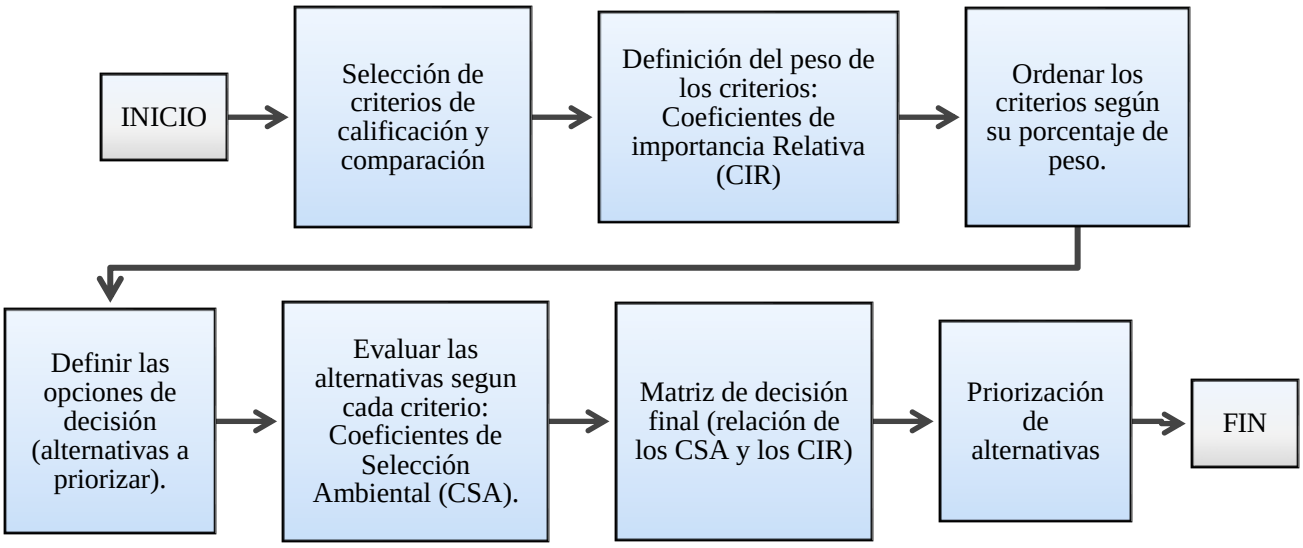
Figura 15. *Cálculo final para obtener la priorización de alternativas según método AHP.*



Fuente: adaptado de Bernal Romero, 2018.

A continuación, se presenta de manera gráfica el desarrollo del segundo objetivo:

Figura 16. *Diagrama de flujo de la metodología seguida para el desarrollo del segundo objetivo.*



Fuente: elaboración propia.

6.5.3 Plantear una hoja de ruta para la implementación de un proyecto piloto de una de las tecnologías priorizadas.

De una de las tecnologías anteriormente priorizadas se construyó una hoja de ruta para su implementación. Para ello, mediante revisión bibliográfica y a través de información secundaria se planteó un paso a paso, lo más específico posible donde se describe a detalle la implementación de la alternativa seleccionada, así como los recursos que se requieren.

Para ello, se tomó como base la metodología empleada en el trabajo *Alternativas de economía circular para incrementar la eficiencia de los recursos de una empresa textil, caso Infinita Estampa*, de Hernández Gómez & Gómez Sotelo (2021) para la elaboración de un plan de acción u hoja de ruta. Se realizó lo siguiente:

1. Se **definió la información general de la hoja de ruta**, donde se incluye: Objetivos de desarrollo sostenible relacionados, descripción de la tecnología, objetivo de la implementación, área o proceso específico relacionado, metodología y características de su implementación y otras observaciones.

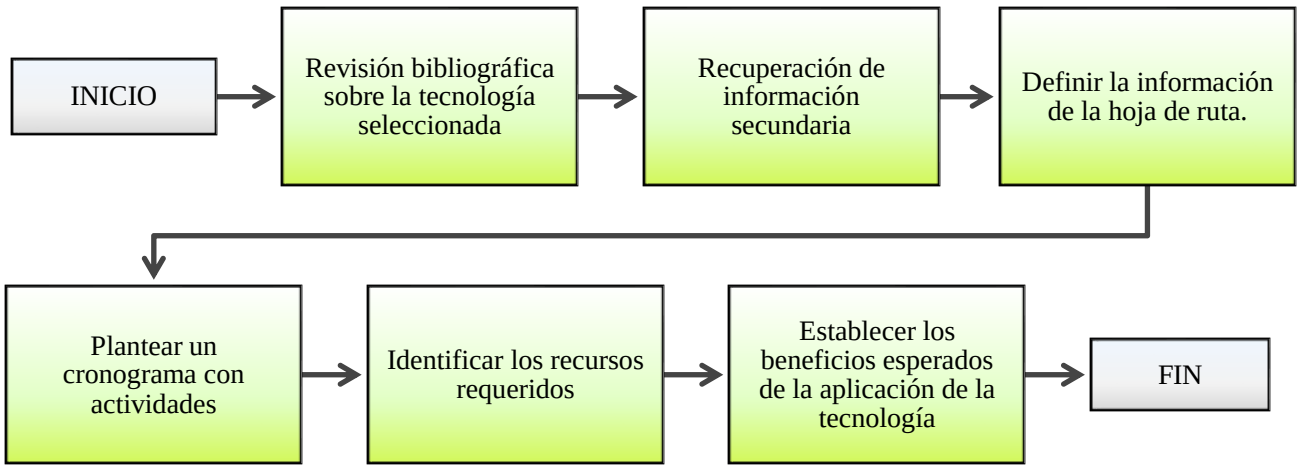
2. Se **planteó un cronograma general de aplicación** en semanas y meses, indicando las principales actividades y responsables de su desarrollo.

3. Se **identificaron los principales recursos necesarios** para la implementación de la tecnología priorizada.

4. Se **expusieron los beneficios esperados** de la aplicación de dicha tecnología, ya sean a nivel económico, ecológico y social.

A continuación, se presenta de forma gráfica la metodología implementada:

Figura 17. *Diagrama de flujo de la metodología seguida para el desarrollo del tercer objetivo.*



Fuente: elaboración propia.

7. Aspectos Éticos

En la presente monografía se empleó información secundaria, por ende, se buscó obtenerla de fuentes confiables, garantizando la fiabilidad de los datos. De igual forma, se reconoce la autoría de la información revisada y empleada, mediante la citación y referenciación de la misma, dentro de los estándares de la American Psychological Association, usando el estilo APA sexta edición. Así mismo, los procedimientos empleados en la metodología están basados en referentes debidamente citados. Teniendo en cuenta la ley 1032 de 2006 del Congreso de Colombia, en la que se establece el plagio como delito, se declara que el presente documento NO ha incurrido en la violación de derechos de autor.

De igual manera se señala que el software empleado para el análisis bibliométrico (Bibliometrix de Rstudio) de información es gratuito y de uso libre.

8. Resultados, análisis y discusión

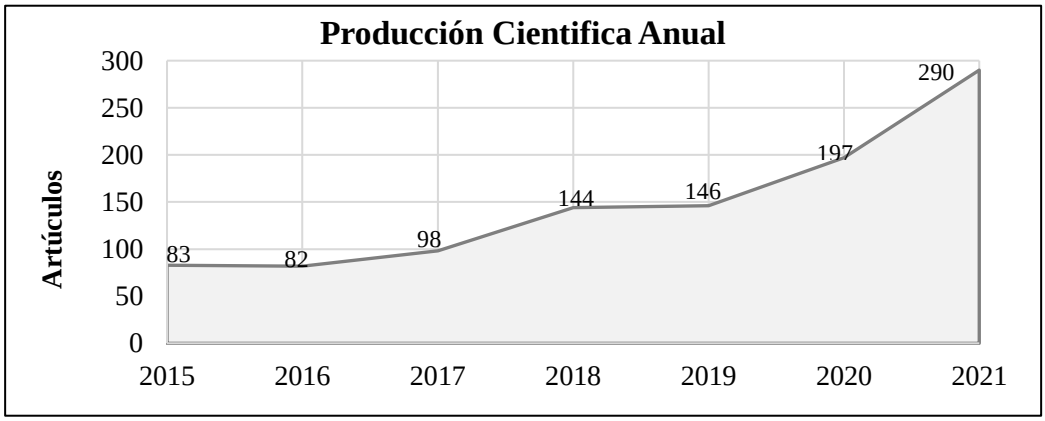
8.1 Análisis del panorama investigativo actual, tanto global como local, sobre las tecnologías existentes para la transformación y reciclaje de plástico PET

8.1.1 Tendencias investigativas a nivel mundial sobre el reciclaje plástico PET

A partir de la búsqueda inicial realizada en la base de datos de Scopus, y del análisis bibliométrico con la herramienta Bibliometrix, se tomaron como muestra de análisis 1.040 artículos entre el periodo de 2015 y 2021, de 3932 autores, provenientes de 401 fuentes. Se obtuvieron las siguientes métricas que permiten conocer el panorama investigativo sobre el reciclaje de PET a nivel mundial.

En primer lugar, se tiene el crecimiento anual de la producción científica en el campo del reciclaje del tereftalato de polietileno, que corresponde al número de artículos publicados por año, donde la tasa anual de crecimiento es del 23,18% (*Figura 18*). Se puede notar una tendencia de crecimiento exponencial pasando de 83 artículos en 2015 a 290 en 2021. El crecimiento es más notable sobre todo en los últimos años desde el año 2019 al 2020, lo que indica que el tema del reciclaje de PET cada vez va tomando mayor interés en la comunidad científica por lo que se han desarrollado muchas más investigaciones al respecto.

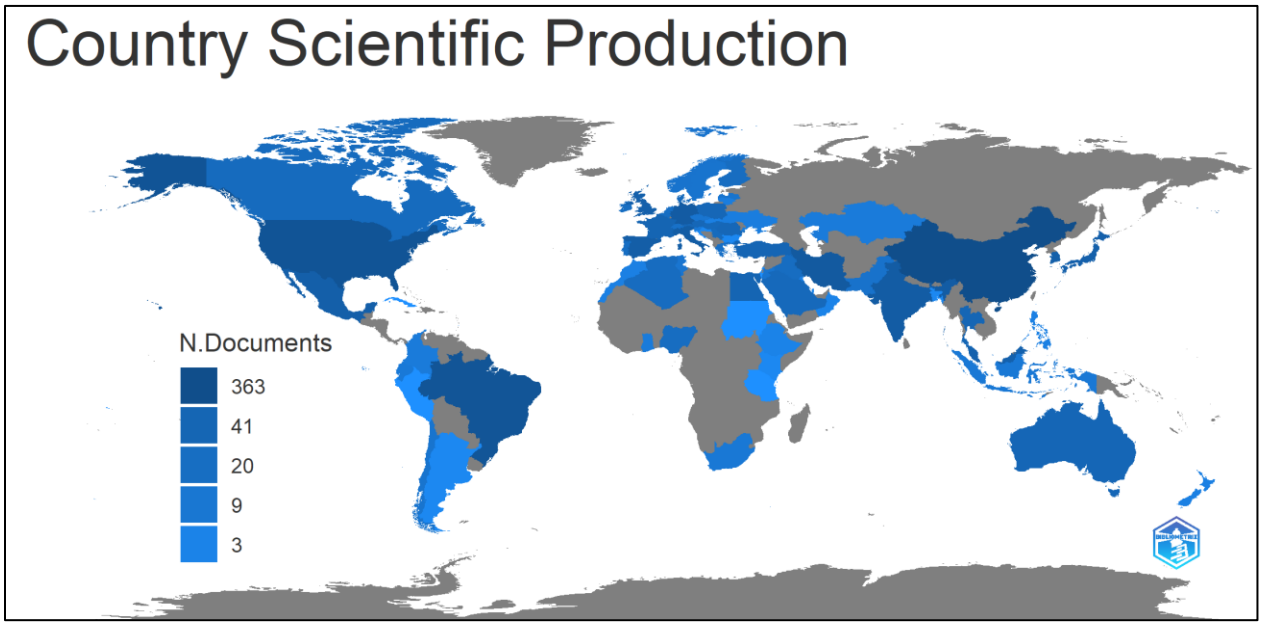
Figura 18. *Producción científica sobre el tema en los últimos siete años.*



Fuente: Elaboración propia.

Los países líderes en investigación sobre el reciclaje de PET son: China con 363 artículos, Estados Unidos con 201, Brasil con 186, Irán con 117 y Alemania con 103 artículos. Colombia se encuentra en el lugar 52, con seis artículos publicados, de acuerdo con los criterios de análisis, lo que permite inferir que en el país la investigación científica respecto a nuevas tecnologías e innovaciones para el reciclaje del plástico PET es muy poca en comparación con los países líderes en este tema. A continuación, se muestra la distribución de la producción científica sobre el tema, en el mundo:

Figura 19. *Producción científica por país sobre el reciclaje de PET.*



Fuente: Elaboración propia.

Tal y como se muestra en la *Figura 19*, donde más se generan producciones científicas en cuanto al reciclaje de PET es en Norte América, Europa y parte de Asia, y particularmente en Colombia, esta es muy baja en comparación con los países líderes en investigación, de acuerdo con el set de datos empleados para el análisis.

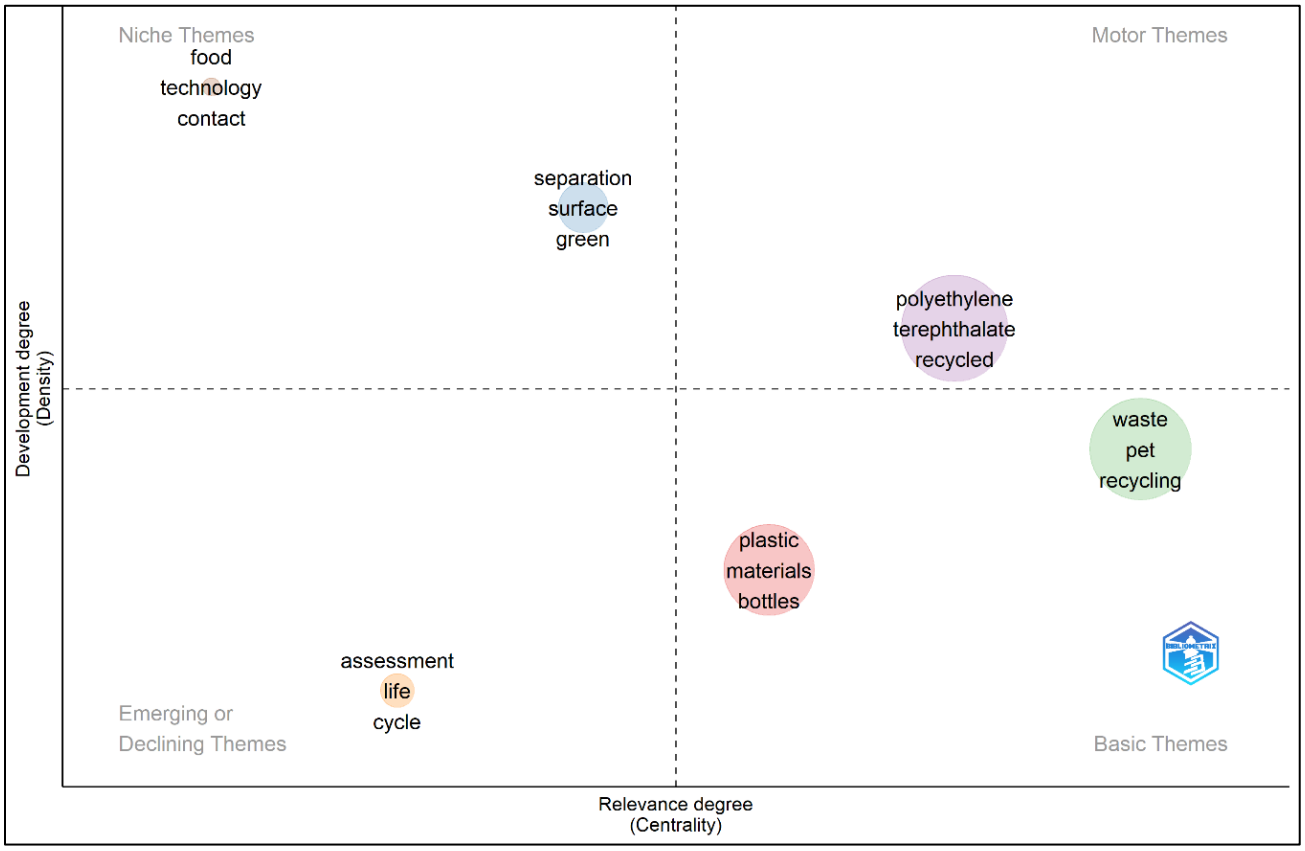
Por otro lado, se presenta el mapa temático del campo Keywords en la *Figura 20*, que corresponde a las palabras con mayor frecuencia de aparición en los títulos y referencias de los artículos analizados. El mapa temático delinea la estructura conceptual del tema, es decir, que bibliometrix, mediante un análisis de redes de coocurrencia dibuja grupos de palabras clave que se pueden considerar como temas generales, que se clasifican y se mapea en un diagrama bidimensional (Aria & Cuccurullo, 2022). En el diagrama, el eje *x* representa el grado de centralidad, es decir, la relevancia o la importancia del tema dentro del campo de investigación, y el eje *y* corresponde a la densidad que es la medida del desarrollo del tema, así mismo, el tamaño de la burbuja es proporcional a la ocurrencia de las palabras en el campo de inestigación (Aria & Cuccurullo, s.f.). Mediante este mapa se puede analizar de forma intuitiva los temas relacionados con el reciclaje de tereftalato de polietileno o PET, según el cuadrante en donde se encuentran.

El cuadrante superior izquierdo aborda temas muy especializados, desarrollados y aislados (nichos), es decir, temas de alta densidad que tienen una importancia limitada para el campo (baja centralidad) (Della Corte, Del Gaudio, Sepe, & Sciarelli, 2019). Aquí se encuentran conceptos como *separación*,

contacto, *superficie* y *verde*, que se pueden relacionar dentro de la gestión de residuos sólidos y la sostenibilidad. El término comida se relaciona directamente con los plásticos de un solo uso, puesto que estos se emplean en su mayoría como envases y empaques de alimentos. Llama la atención que el término *tecnología*, se encuentre en este cuadrante, y por su ubicación se puede inferir que, aunque es un tema con alto grado de desarrollo, aún no es de gran relevancia dentro del reciclaje de PET.

En el cuadrante superior derecho se encuentran los temas motores, los cuales se caracterizan por su alta centralidad y densidad, y son los más desarrollados dentro del campo de investigación (Della Corte, Del Gaudio, Sepe, & Sciarelli, 2019). En este caso, el tema motor está relacionado directamente con las palabras clave empleadas para el análisis bibliométrico, y corresponde también al tema principal del presente estudio, y es: *polietileno tereftalato reciclado*.

Figura 20. *Mapa temático del reciclaje de plástico PET.*



Fuente: Elaboración propia.

En el cuadrante inferior izquierdo del mapa temático están los temas emergentes o en declive. En este análisis, los temas emergentes son la *evaluación* y el *ciclo de vida*. El análisis de ciclo de vida (ACV) consta de la recopilación y caracterización de entradas y salidas tanto de masa como de energía a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto, y su evaluación, considerando potenciales impactos ambientales negativos, como la utilización de recursos y las consecuencias ambientales de las emisiones y vertidos (Aristizábal Alzate, González Manosalva, & Gutiérrez Cano, 2020). Esta valoración se hace desde la adquisición de la materia prima, hasta la disposición final (de la cuna a la tumba), pasando por los procesos de producción, transporte, comercialización, consumo, desecho y tratamiento final.

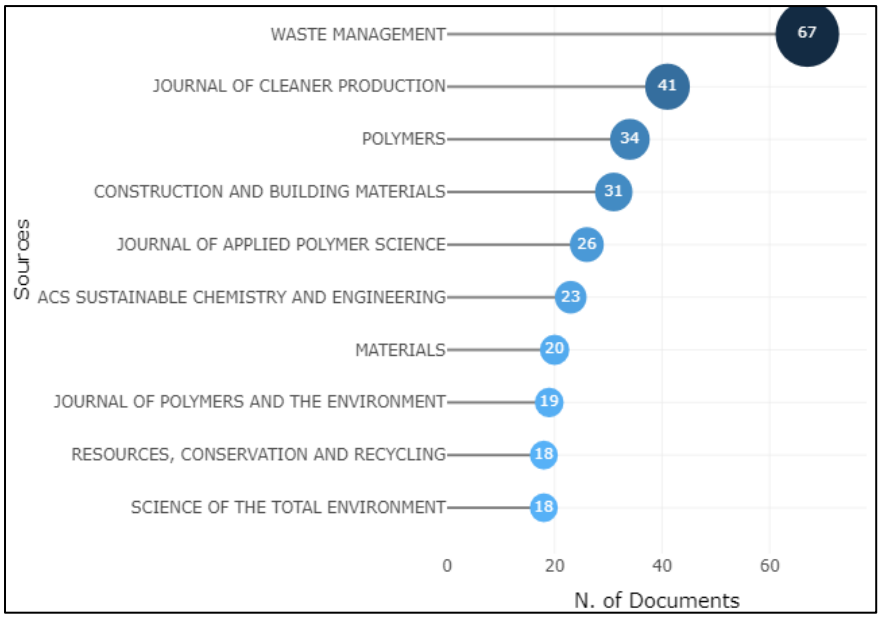
Teniendo en cuenta el ciclo de vida como un tema emergente dentro del reciclaje de PET, se puede deducir que cada vez se busca abordar la problemática de los residuos plásticos desde más atrás en el ciclo productivo, desde el diseño y la cuna, más allá del residuo en sí. Dentro de los procesos de reciclaje, el ACV que más se adecua es el que va de la cuna a la cuna, donde el "residuo" no se dispone completamente, sino que vuelve materia prima iniciando nuevamente el ciclo; aquí se incluyen los procesos de gestión, valorización o reutilización del residuo, que se enmarcan en la economía circular. El ACV constituye también una herramienta que permite la gestión de la sostenibilidad de un producto o servicio, porque "incrementa el conocimiento y la comprensión acerca de la interacción de los materiales y procesos con el medio ambiente y los alrededores" (Aristizábal Alzate et al., 2020).

Finalmente, el cuadrante inferior derecho muestra los temas que son básicos y transversales. Estos temas son generales a las diferentes áreas de investigación dentro del campo (Della Corte, Del Gaudio, Sepe, & Sciarelli, 2019). Aquí se encuentran los temas de mayor relevancia en el campo del reciclaje de PET, y las palabras aquí encontradas son *materiales plásticos*, *botellas*, *residuos*, *PET* y *reciclaje*.

En la *Figura 21*, se presentan las fuentes más relevantes, es decir las revistas que más documentos han publicado sobre el tema, durante los siete años considerados para el análisis. En primer lugar, se destaca la revista *Waste Management* con 67 publicaciones, que es una revista internacional sobre gestión integrada de residuos, ciencia y tecnología. Esta se centra en la presentación y discusión de información sobre la generación, caracterización, minimización, recolección, separación, tratamiento y eliminación diversos residuos sólidos, como los municipales, agrícolas y especiales; además trata temas como políticas de gestión de residuos, educación y evaluaciones económicas y ambientales (Elsevier, 2022).

En segundo lugar, se encuentra *Journal of Cleaner Production* con 41 artículos. Es una revista internacional transdisciplinaria que se enfoca en la investigación y práctica de la producción más limpia, y en temas como el medio ambiente y la sostenibilidad (Elsevier, 2022). Y en tercer lugar se tiene la revista *Polymers* con 34 publicaciones, una revista internacional de acceso abierto sobre la ciencia de los polímeros que publica trabajos de investigación, comunicaciones y artículos de revisión (MDPI, 2022).

Figura 21. *Fuentes más relevantes sobre el reciclaje de PET.*

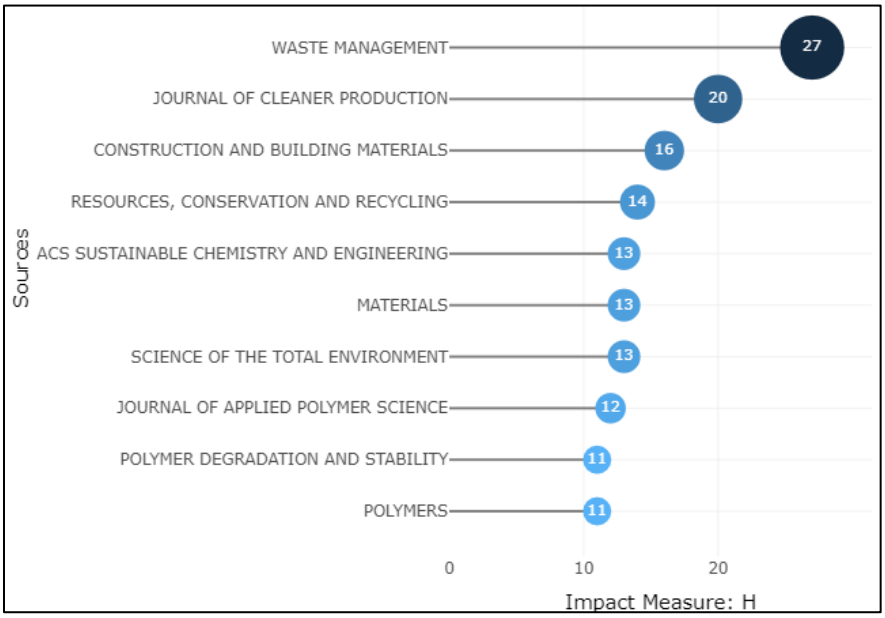


Fuente: Elaboración propia.

En la *Figura 22* se presentan las fuentes con mayor impacto de acuerdo con el índice H, nótese que allí se encuentran varias de las fuentes más relevantes mostradas anteriormente en la *Figura 21*. El índice H, en cuanto a revistas, mide el impacto según el número de artículos publicados y la cantidad de veces que ha sido citado cada artículos, es decir, el número de *h* artículos que han sido citado *h* veces; por ejemplo, si el índice H es 5, significa que la revista, en este caso, tiene cinco publicaciones que han sido citadas por lo menos cinco veces (Vargas Pacheco, 2022).

En este sentido, se tienen como las fuentes de mayor impacto las revistas *Waste management* con un índice H de 27, y *Journal of Cleaner Production* con un índice de 20; que de acuerdo con el set de información empleado para el análisis bibliométrico son las revistas que más publican sobre el reciclaje y el PET, indicando también que son de las fuentes más citadas. Es decir que estas fuentes se mantienen tanto como las más productivas como las más relevantes en el campo de investigación abordado. Se destaca la tercer fuente de mayor impacto, que es la revista *Construction and Building Materials* una revista internacional que se dedica a la difusión de investigaciones y desarrollos innovadores y originales en el campo de la construcción, materiales de construcción y prácticas de reparación (ScienceDirect, 2022), donde los polímeros y materiales de reciclados son considerados materiales de construcción novedosos y de interés.

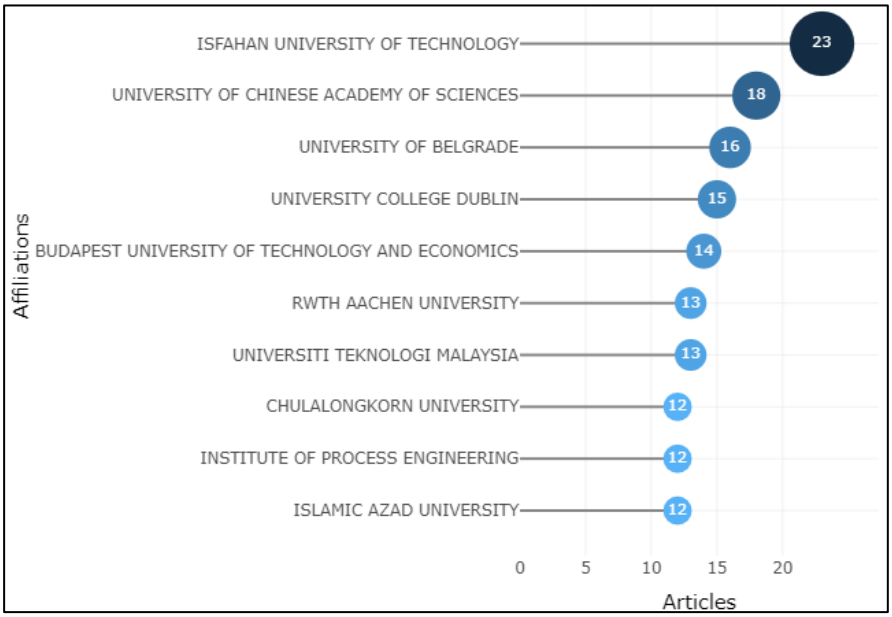
Figura 22. *Impacto local de las fuentes: índice H.*



Fuente: Elaboración propia.

Las diez instituciones con mayores investigaciones afiliadas se presentan en la *Figura 23*, donde se muestra la cantidad de publicaciones registradas que poseen las universidades en la temática de reciclaje de tereftalato de polietileno. Lo encabeza la Isfahan University of Technology, una universidad pública ubicada en la ciudad de Isfahan en Irán, uno de los países con más publicaciones sobre en reciclaje de PET, con 23 artículos afiliados, en segundo lugar, se tiene a la University of Chinese Academy of Sciences, ubicada en Pekín, China y cuyo enfoque es la educación en posgrado, con 18 publicaciones; y en tercer lugar se tiene a la University of Belgrade, ubicada en la ciudad de Belgrado en Serbia con 16 artículos. Las demás universidades mostradas se encuentran ubicadas en Europa, en países como Irlanda, Hungría y Alemania, y parte de Asia en países como Malasia, Tailandia, China y Emiratos Árabes.

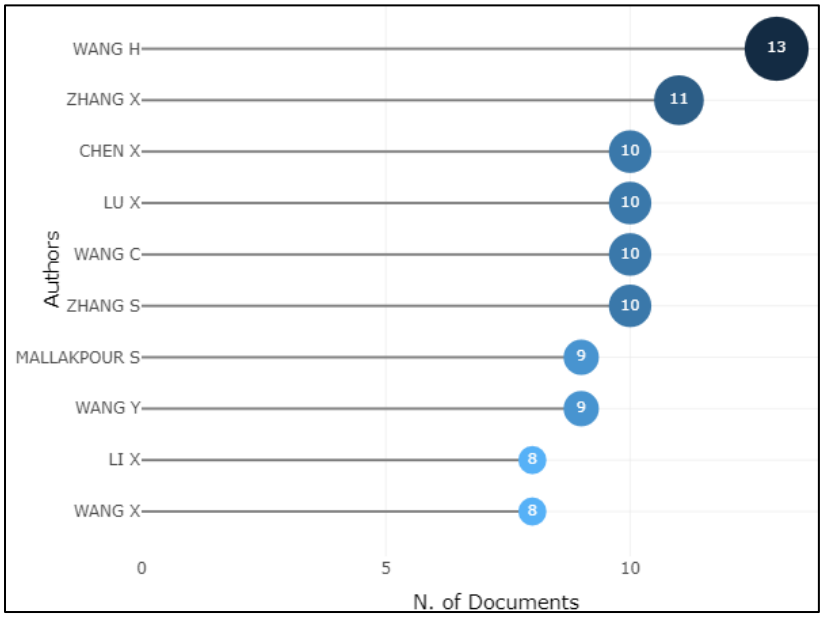
Figura 23. *Afiliaciones más relevantes*



Fuente: Elaboración propia.

Dentro de las investigaciones desarrolladas según los parámetros de evaluación, en la *Figura 24* tiene los autores más relevantes sobre el tema, es decir, los que más artículos han publicado al respecto. En primer lugar, se tiene a Wang H. con 13 artículos, después esta Zhang X. con 11 trabajos, seguido de Chen X., Lu X., Wang C. y Zhang S. con 10 artículos cada uno.

Figura 24. *Autores más relevantes.*

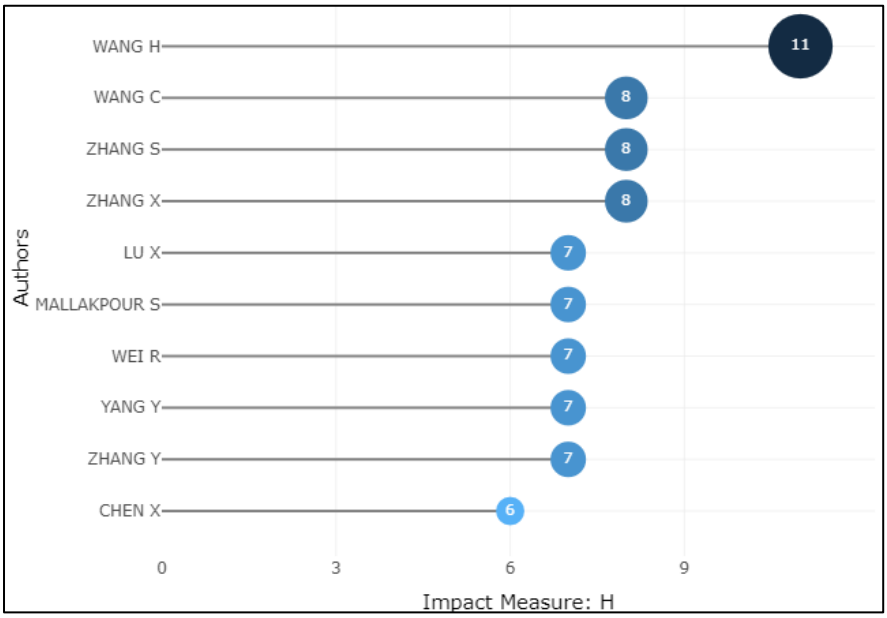


Fuente: Elaboración propia.

En la *Figura 25*, se presenta el impacto de los autores de acuerdo con el índice H. Tal y como se ha mencionado anteriormente, este indicador propuesto por Jorge Hirsch de la Universidad de California, en 2005, mide la cantidad y el impacto de la producción de autores y científicos, en función de la cantidad

de citas que han recibido sus artículos científicos (Miró & Burbano, 2013), así un autor tiene un índice *h* si, entre todos sus trabajos, tiene *h* que reciben al menos *h* citas cada uno.

Figura 25. *Impacto local de los autores: índice H.*



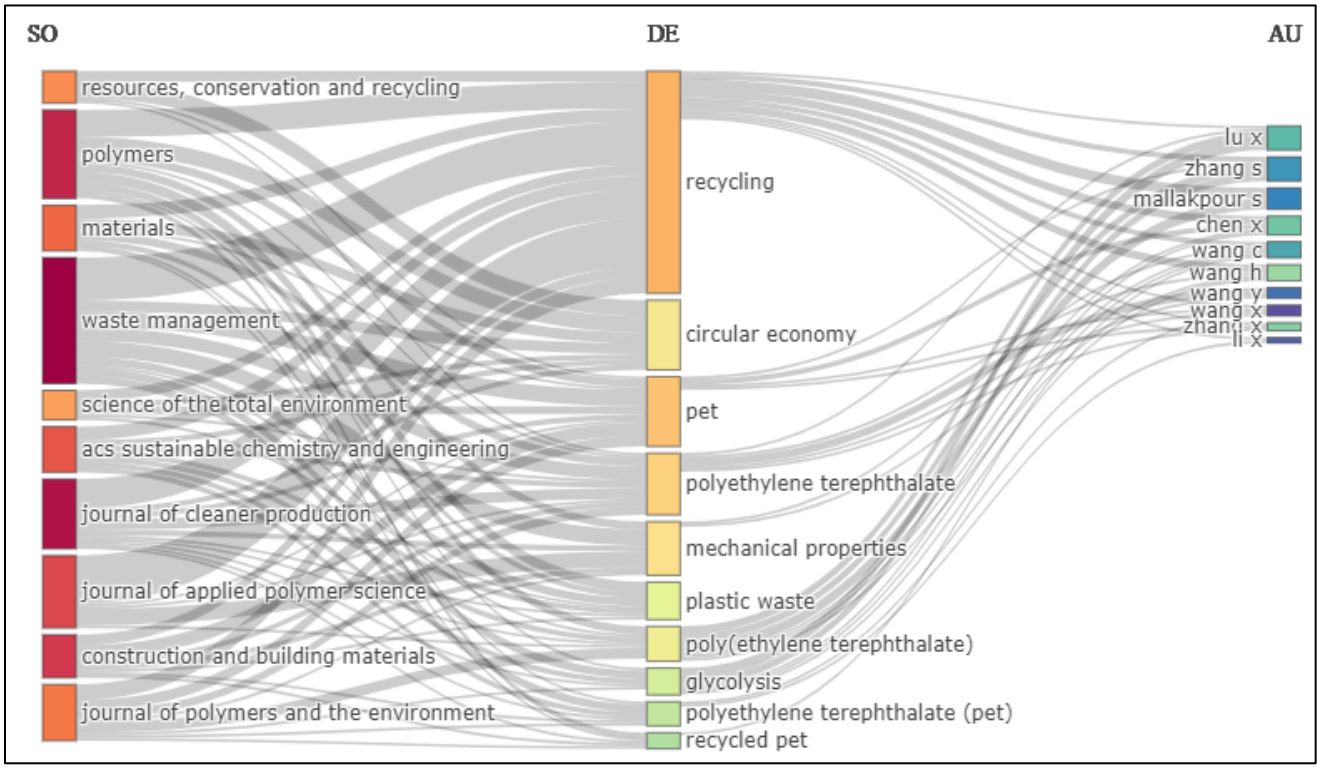
Fuente: Elaboración propia.

Tal y como se muestra en la figura anterior, el autor con mayor impacto es Wang X., con un índice H de 11, es decir que de sus 13 artículos publicados durante el periodo 2015-2021, 11 de ellos han sido citados al menos unas 11 veces en dicho periodo. Le siguen Wang C., Zhang S. y Zhang X. con un índice H de 8, cada uno, lo que puede indicar que estos autores tienen una relevancia similar en dentro del campo del reciclaje de PET. Sin embargo, es importante destacar que este índice presenta ciertas desventajas y limitaciones como: que prima la cantidad sobre la calidad, varía según la base de datos utilizada, subestima los trabajos más citados, perjudica a investigadores con pocas publicaciones o con corta trayectoria, y depende de los hábitos de publicación y citación del campo investigativo que se aborda (Miró & Burbano, 2013).

En la *Figura 26* se muestra un **gráfico de tres campos** donde se presenta la relación entre revistas, palabras clave y autores, que permite la identificar la relación de las temáticas que tienen un mayor número de atención por parte de los autores y las revistas dentro de este campo de estudio. Este diagrama se conoce también como Diagrama de Sankey y se utiliza permite visualizar flujos o vínculos entre diversos factores bibliográficos, e ilustrar información cuantitativa sobre temáticas y sus referencias (Bulgarelli-Bolaños & Hernández-Salazar 2020).

En la gráfica se toma como campo central las diez palabras claves más empleadas en los artículos analizados, y se relacionó mediante “flujos” con las diez principales revistas y autores que desarrollaron las investigaciones sobre el reciclaje y el plástico PET. La intensidad de cada flujo revela la cantidad de conexiones que existen entre cada una de las variables consideradas (Bulgarelli-Bolaños & Hernández-Salazar 2020).

Figura 26. *Gráfico de tres campos (relación entre revistas o fuentes, palabras clave y autores).*

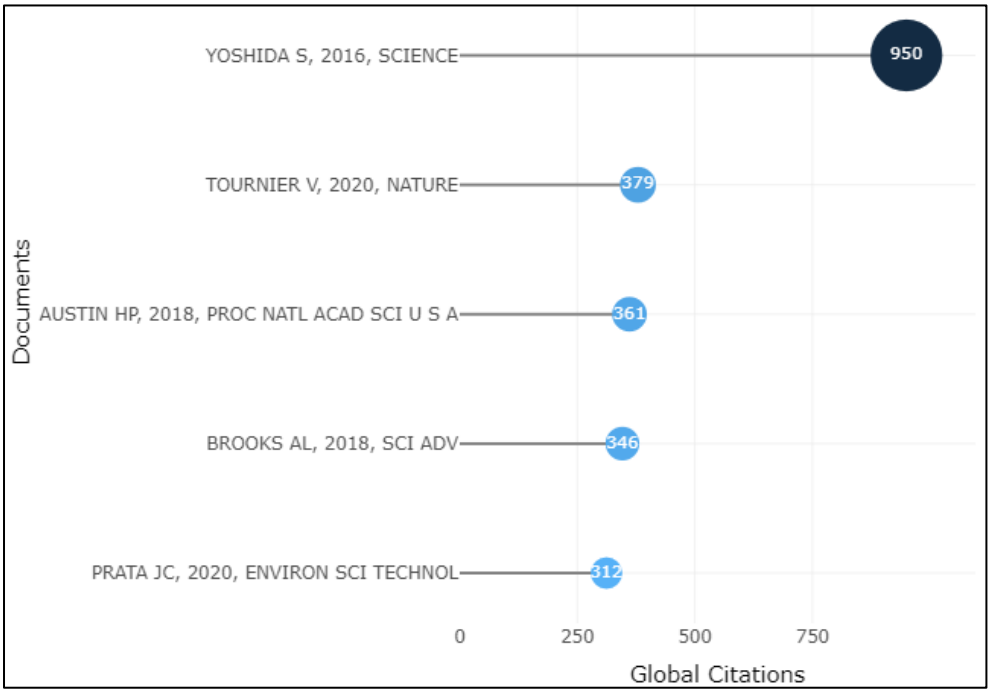


Fuente: Elaboración propia.

De esta manera, se puede apreciar que el eje principal del es el reciclaje, donde se concentran la mayoría de los autores y revistas. Un tema importante dentro de las fuentes analizadas es la economía circular, que es poco abordada dentro de los diez autores más relevantes, pero que es de los temas más abordados por la mayoría de las revistas. Otras palabras claves destacadas son las relacionadas con el tereftalato de polietileno o plástico PET. Llama la atención otras palabras como “propiedades mecánicas” que es abordada por unas cinco revistas y dos autores, y la palabra “glucólisis” abordada por diversos autores y que hace referencia a un método de reciclaje químico donde se degrada molecularmente el polímetro del PET mediante la ruptura de varios enlaces moleculares.

Finalmente se destacan los cinco artículos más citados a nivel mundial (*Figura 27*) de los que se hará una breve descripción con el fin de conocer las innovaciones y desarrollos más relevantes en cuanto al reciclaje del tereftalato de polietileno:

Figura 27. *Documentos más citados a nivel mundial.*



Fuente: Elaboración propia.

El primer artículo más citado es el desarrollado por Yoshida et al, en 2016 y se titula *A bacterium that degrades and assimilates poly (ethylene terephthalate)*. Los autores abordan la preocupación mundial existente debido a la acumulación de tereftalato de polietileno o PET en el ambiente, y su compleja degradación; los procesos para ello aún son muy limitados por lo que la biodegradación de este plástico no es una estrategia de remediación o reciclaje viable, al menos por ahora. Sin embargo, el artículo presenta el descubrimiento de una nueva bacteria llamada *Ideonella sakaiensis201-F6* aislada mediante el cribado de comunidades microbianas naturales expuestas a PET, que es capaz de utilizar el PET como fuente principal de energía y carbono. Para ello produce dos enzimas capaces de hidrolizar el PET y que pueden llegar a convertirlo enzimáticamente en dos monómeros ambientalmente benignos, ácido tereftálico y etilenglicol (Yoshida et al., 2016). La investigación de Yoshida et al, presenta un gran avance en la biodegradación de plásticos, mostrando que el empleo de bacterias especializadas podría ser una estrategia de biorremediación viable a futuro.

En segundo artículo corresponde al estudio de Tournier et al de 2020, *An engineered PET depolymerase to break down and recycle plastic bottles*, en el que se describe una enzima una hidrolasa de PET mejorada que logra en 10 horas un mínimo de 90 % de despolimerización de PET en monómeros, es decir que logra romper las cadenas de la molécula. Esta enzima es altamente eficiente y optimizada, y llega a superar a todas las hidrolasas de PET reportadas hasta el momento de la publicación del estudio (Tournier et al., 2020), incluso es más eficiente que la enzima de la bacteria *Ideonella sakaiensis 201-F6* abordada por Yoshida et al en el artículo anteriormente descrito, lo que muestra el avance científico en la mejora de los procesos de biodegradación de este material. Este estudio también muestra que el PET reciclado biológicamente, es decir el producido a partir de residuos de PET despolimerizados enzimáticamente y nuevamente transformados en botellas, tiene las mismas propiedades que el PET petroquímico, por lo que es se contribuye al concepto de economía circular de PET (Tournier et al., 2020).

Por otro lado, también se tiene el estudio *Characterization and engineering of a plastic-degrading aromatic polyesterase* de 2018 de Austin et al, que a partir del descubrimiento de la bacteria *Ideonella sakaiensis201-F6* de Yoshida et al, busca describir y caracterizar la enzima capaz de biodegradar el PET, denominada "PETasa". En el estudio se presenta la estructura de la enzima, y las características que esta tiene en común con otras enzimas como las cutinasas y las lipasas. Así mismo se sugiere que PETasa no está completamente optimizada para la degradación de PET cristalino, a pesar de que presumiblemente evoluciona en un ambiente rico en PET (Austin et al., 2018). Los autores también señalan que se puede usar las ingeniería para modificar estas enzimas aumentando su rendimiento para degradar el PET, por lo que resaltan la necesidad de mayores desarrollos de las relaciones estructura/actividad de las enzimas para la biodegradación de plásticos (Austin et al., 2018).

Estos tres primeros estudios muestran un poco como ha venido evolucionando la investigación científica en torno a nuevas alternativas para tratar los residuos de plástico PET, como lo es la biodegradación a partir de enzimas de bacterias u otros organismos, métodos que poco a poco se han ido optimizando y que en un futuro podría implementarse a mayor escala, más allá de los laboratorios,

El cuarto estudio es el de Brooks, Wang y Jambeck, de 2018, titulado *The Chinese import ban and its impact on global plastic waste trade*, que muestra otra perspectiva de la problemática del plástico desde la política pública y la exportación de desechos plásticos destinados al reciclaje a cientos de países de todo el mundo. El estudio muestra que los países de ingresos más altos en la Organización para la Cooperación Económica han estado exportando desechos plásticos a países de ingresos más bajos en el este de Asia y el Pacífico durante décadas (Brooks, Wang, & Jambeck, 2022). Se aborda específicamente sobre una política que prohíbe la importación de la mayoría de los desechos plásticos en China, lo que plantea el cuestionamiento de a dónde irán dichos residuos. Los autores estiman que 111 millones de toneladas métricas de desechos plásticos serán desplazados con la política china para 2030, por lo que hacen un llamado a proponer y plantear ideas y acciones globales para reducir las cantidades de materiales no reciclables, rediseñar productos y financiar la gestión de residuos plásticos domésticos (Brooks et al., 2022).

Finalmente se tiene a Prata, Silva, Walker, Duarte, y Rocha-Santos, con su estudio de 2020, *COVID-19 Pandemic Repercussions on the Use and Management of Plastics*, que muestra el contexto de la contaminación del plástico durante la emergencia sanitaria de COVID, debido a la mala gestión de los desechos de elementos de protección personal como mascarillas y guantes. Lo que conllevo a impactos en los ecosistemas y organismos, y a riesgos para la salud pública, puesto que los desechos plásticos son un vector del virus, que sobrevive hasta 3 días en estos (Prata, Silva, Walker, Duarte, & Rocha-Santos, 2020). La preocupación de que los plásticos reutilizables podrían ser vectores del virus contribuyó a la reversión de las prohibiciones de los plásticos de un solo uso durante la emergencia, por ello los autores plantean la necesidad de reforzar las acciones de concientización del público sobre el uso y la disposición adecuada de estos residuos.

8.1.2 Principales tecnologías para la transformación y reciclaje de plástico PET.

De acuerdo con diversos autores, los principales procesos para el reciclaje del plástico se dividen en cuatro partes, que van desde el reciclaje primario hasta el cuaternario. A continuación, se describen de manera general:

- **Reciclaje primario**

El reciclaje primario o de circuito cerrado incluye los procesos en los que se producen productos como el plástico original, por este método se pueden procesar plásticos posconsumo de origen conocido (Prajapati, Kohli, Maity, & Sharma, 2021). Los polímeros se vuelven a colocar en el ciclo de reprocesamiento y se extruyen produciendo materiales reciclados de rendimiento similar al material virgen (Jones, Saffar, Koutsos, & Ray, 2021). En otras palabras, son procesos físicos que buscan que el producto mantenga las mismas propiedades que el material original.

Lo fundamental en este tipo de reciclaje es *la limpieza y el pretratamiento* del plástico, sobre todo cuando se implementan tecnologías para procesar los materiales. Con ello se busca mejorar el proceso de clasificación y eliminar la contaminación adherida del uso antes de la transformación. Para esto, es necesario el empleo de agentes de limpieza y auxiliares de procesamiento, y particularmente en el reciclaje de PET, esta etapa es de especial importancia (Mangold & von Vacano 2022).

Para que estos procesos de limpieza y pretratamiento sean eficientes y sostenibles dentro del concepto de la producción más limpia es importante considerar el tratamiento de las aguas residuales resultantes. Los nuevos desarrollos en esta etapa se centran en la reducción de los consumos de agua y energía mediante la aplicación de aditivos específicos al proceso de lavado y posterior tratamiento de aguas residuales, así como también en el uso de tensioactivos especiales que eliminen etiquetas o pegamento de la superficie de plástico de manera eficiente (Mangold & von Vacano 2022).

En el reciclaje primario es crucial conocer el origen de la fuente del desecho plástico a tratar, su aplicación previa y su historia, con el fin de garantizar bajos niveles de contaminación y alta pureza polimérica. Este tipo de reciclaje destaca por la producción de materiales reciclados de alta calidad y la reducción de los costos de energía (Jones et al., 2021). Los materiales poliméricos pueden entrar en contacto con impurezas y contaminantes del entorno circundante durante el uso del servicio y la recuperación posterior, que pueden difundirse en la masa polimérica debido a su naturaleza permeable, esto es lo que se conoce como contaminación molecular.

Existe una amplia gama de posibles compuestos de bajo peso molecular, ya sean impurezas inherentes o introducidas externamente, que pueden estar presentes en los flujos de desechos plásticos y plásticos reciclados, llegando a afectar el rendimiento y la aplicabilidad en un uso de próxima generación de productos reciclados (Vilaplana & Karlsson, 2008). Las botellas de PET generalmente se someten a procesos de reciclaje primario.

- **Reciclaje secundario**

El reciclaje secundario o mecánico, puede tratar los materiales plásticos para producir productos que se pueden utilizar en diferentes formas. Este implica la clasificación, molienda, lavado y extrusión por medios mecánicos (Prajapati et al., 2021). La diferencia con el reciclaje primario es que el uso de estas técnicas de procesamiento de manera constante puede llevar a la degradación del polímero, por lo que en ocasiones no se conservan las propiedades iniciales, lo que limita la aplicación del producto reciclado.

Tanto para el reciclaje primario, como para el secundario, la recuperación de plásticos se hace a través de procesos físicos como fusión, trituración, trituración y extrusión; ambos emplean procesos mecánicos para recuperar plásticos, pero difieren en la calidad del producto final (Jones et al., 2021). Mediante estos procesos, la estructura del polímero permanece en gran parte sin cambios. Para los termoplásticos como el PET, que son plásticos que se pueden calentar y moldear varias veces, y que constituyen más del 75

% de todos los plásticos utilizados en todo el mundo, la fusión y la reextrusión son los métodos más sencillos para su reciclaje (Mangold & von Vacano 2022). Generalmente se emplea la misma maquinaria y flujos de trabajo que para el procesamiento de plásticos vírgenes.

- **Reciclaje terciario**

Conocido también como reciclaje químico, utiliza procesos como hidrólisis, solvólisis, craqueo térmico y catalítico, gasificación o pirólisis para romper la estructura molecular del polímero y recuperar los hidrocarburos en forma de combustibles o productos químicos, según la configuración del proceso (Prajapati et al., 2021). Este tipo de reciclaje ha tomado gran interés, principalmente porque produce productos de alto valor, sin embargo, aún no se implementa ampliamente a gran escala.

Estos procesos implican la conversión química de polímeros en monómeros u oligómeros que se pueden lograr mediante reacciones de despolimerización (Jones et al., 2021). El reciclaje químico se puede dividir en dos subgrupos, primero los procesos donde el polímero se recicla en sus monómeros constituyentes que luego se pueden polimerizar nuevamente, o conversiones a alta temperatura como la pirólisis y la gasificación, donde una mezcla de se obtienen fragmentos moleculares más pequeños (Mangold & von Vacano 2022).

En cuanto a las conversiones a alta temperatura, como ya se mencionó anteriormente, existen dos técnicas principales, en las cuales es posible utilizar residuos plásticos mixtos y contaminados. De estos procesos se generan molecular que se pueden utilizar como materia prima para la producción de nuevos polímeros y compuestos, productos químicos valiosos o combustible, contribuyendo a una economía plástica circular (Jones et al., 2021):

- Pirólisis: este proceso se lleva a cabo a temperaturas superiores a 300 °C en ausencia de oxígeno; se obtiene como producto una mezcla de hidrocarburos de cadena corta (aceite de pirólisis) y gases, pero principalmente el aceite se puede reutilizar (Mangold & von Vacano, 2022)..

- Gasificación: en este proceso se añaden cantidades controladas de oxígeno o vapor de agua a temperaturas entre 700 y 1600 °C, y los productos obtenidos son componentes químicos aún más pequeños, principalmente CO e hidrógeno (Mangold & von Vacano, 2022).

Muchas tecnologías para el reciclaje químico son emergentes y aún no están del todo desarrolladas, por ello aún no se implementan de manera sistematizada a gran escala y de forma industrial, además porque requieren mucha inversión, personal experto, y tiene altos costos energéticos (Jones et al., 2021). Muchos de los métodos para este tipo de reciclaje todavía están en investigación, por ejemplo, para la gasificación y pirólisis se realizan varias indagaciones para establecer las condiciones adecuadas de su implementación. La molécula del PET puede ser separada por algunos reactivos, como agua (hidrólisis), ácidos (acidólisis), glicoles (glucólisis) o alcoholes (alcohólisis) (Grigore, 2017). Los productos varían según el tipo de reactivo empleado.

- **Reciclaje Cuaternario**

El *reciclaje cuaternario* consiste en la incineración de los polímeros plásticos para la recuperación de energía en forma de calor (Prajapati et al., 2021), generalmente se hace cuando el plástico no puede ser recuperado por los anteriores métodos, pero presenta varias desventajas como la liberación gases peligrosos en el medio ambiente y la producción de residuos tóxicos.

Este proceso puede utilizarse para generar electricidad siendo una alternativa a la quema de combustibles fósiles. Al ser derivados del petróleo, los plásticos generan una cantidad significativa de energía debido a su alto valor calorífico, sin embargo, la incineración produce cenizas cuya cantidad y composición varía según la composición de los desechos plásticos y la tecnología de incineración utilizada (Jones et al., 2021).

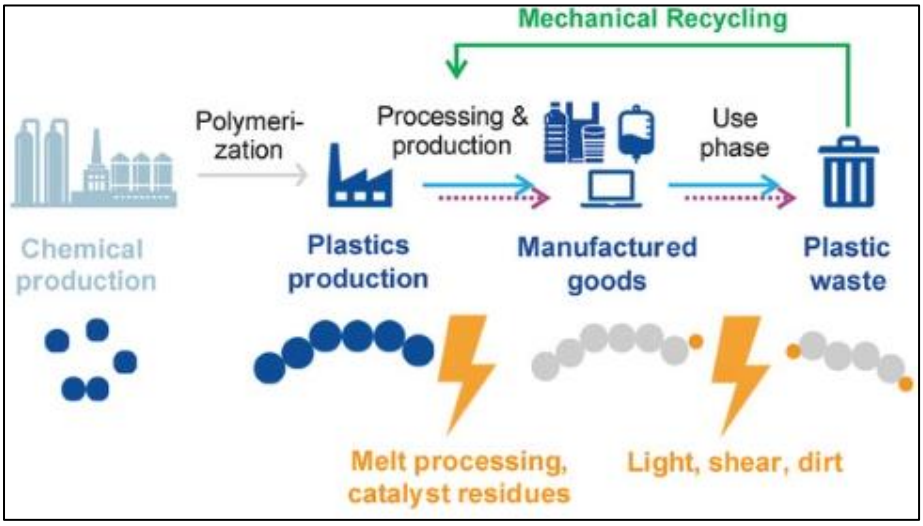
Existen diversas investigaciones en las que se busca mejorar la eficiencia y la sostenibilidad del reciclaje cuaternario, especialmente en cuanto a la producción y liberación de contaminantes orgánicos persistentes, partículas, microplásticos y compuestos tóxicos peligrosos como dioxinas y furanos en el ambiente (Jones et al., 2021). Por ende, este tipo de procesos requiere de condiciones específicas y tecnología especializada para reducir los impactos ambientales, por lo que aún no se implementa de manera generalizada.

Desde una perspectiva de economía circular, se puede observar que las tecnologías siguen estando al final del tubo y que se ocupan de la R del reciclaje para aquellas tecnologías que obtienen materiales o productos plásticos como las del reciclaje mecánico, y de la R de recuperación para aquellas que obtienen moléculas de monómeros o polímeros y de energía como el reciclaje químico y la valorización energética.

Las innovaciones científicas en cuanto a tecnologías para la transformación de PET han ido creciendo a medida que se busca alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible. En este sentido, se han venido explorando nuevas formas para la transformación y tratamiento de residuos plásticos como el PET, dentro de las que se encuentran el reciclaje químico, la recuperación energética e incluso la biodegradación de estos materiales. Sin embargo, estas tecnologías aún son muy emergentes y se encuentran en fase de investigación, por lo que, al menos por ahora, no son una alternativa viable en el contexto del reciclaje en la ciudad de Bogotá, especialmente en la localidad de Suba. Por ende, se explorarán más a profundidad las tecnologías que estén mucho más consolidadas y que sean más accesibles, de modo que el enfoque serán tecnologías de **reciclaje mecánico**.

Tal y como se mencionó anteriormente, este tipo de reciclaje sólo abarca transformaciones físicas enfocadas principalmente a reducir el volumen del material mediante procesos como el prensado o la trituración, antes de fundirlo y darle una nueva forma y uso. Para ello es importante el preprocesamiento y la calidad del material a reciclar. En la siguiente figura se aprecia de manera general el proceso del reciclaje mecánico dentro del ciclo productivo del plástico. Si un polímero se somete varias veces al reciclaje mecánico, se deterioran sus estructuras físicas, lo que puede reducir el rendimiento y la procesabilidad del material (Mangold & von Vacano, 2022).

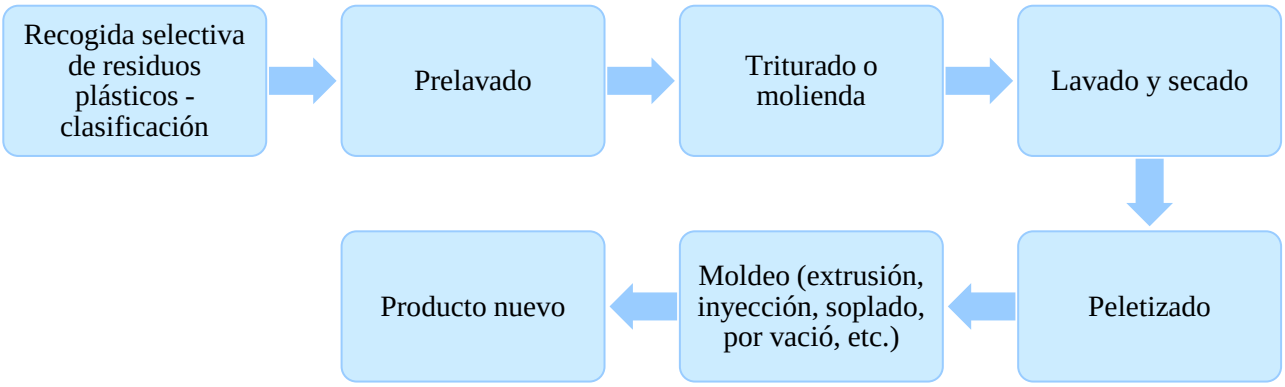
Figura 28. *Proceso general del reciclaje de plástico, donde se destaca el reciclaje mecánico.*



Fuente: Mangold & von Vacano, 2022.

De manera específica, el reciclaje mecánico del plástico involucra diversas etapas, desde la recolección y clasificación de residuos hasta la creación de un nuevo producto (ver *Figura 29*). En este sentido, el papel del reciclaje de oficio en Bogotá generalmente se enfoca en la primera etapa, donde se recolectan y se recuperan estos materiales. Luego estos suelen ser vendidos a intermediarios como bodegas o centros de acopio, o llevados a las organizaciones de recicladores, los cuales, a su vez, luego lo venden a empresas que hacen el tratamiento y la transformación.

Figura 29. *Diagrama de las principales etapas del reciclaje mecánico de plástico, particularmente el PET.*



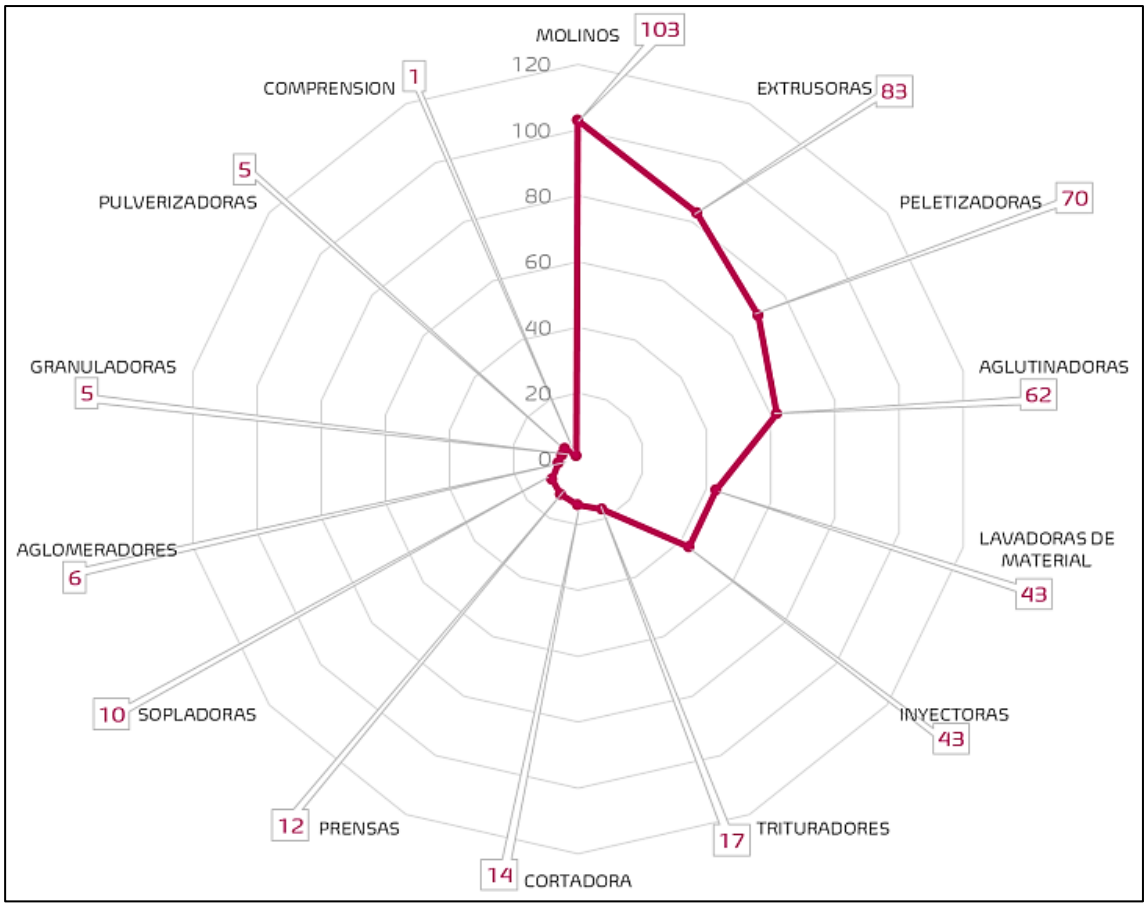
Fuente: Adaptado de Patzi Canaza, 2015.

De acuerdo con Patzi Canaza (2015), el reciclaje mecánico presenta algunas ventajas respecto a otros tipos de reciclaje del plástico PET como: la tecnología es más accesible, conlleva una menor contaminación al ambiente que otros tipos de reciclaje, puede generar productos de mayor valor agregado, genera fuentes de trabajo en toda la cadena de reciclado y la existencia de un mercado para el material molido y limpio, ya sea como insumo o como materia prima para otros productos plásticos.

Para obtener productos de mejor calidad, a menudo, el material reprocesado se puede mezclar con material virgen en el moldeo, puesto que el producto reciclado puede verse afectado por la heterogeneidad de los residuos plásticos y al deterioro de las propiedades del material, particularmente

el PET por el bajo peso molecular de la resina reciclada (Grigore, 2017). Dentro del reciclaje mecánico se encuentran diversos procesos para formar el plástico, para los cuales se emplean diversas maquinarias y tecnologías como las que se presentan en la *Figura 30*. A continuación, se detallarán algunos de estos procesos y tecnologías.

Figura 30. *Tecnologías utilizadas para los procesos de transformación según Informe Técnico- Proyecto "Perfilar 200 empresas transformadoras de Plástico posconsumo en Bogotá" de 2019.*



Fuente: Abaunza Barón, Castellanos Cuadrado, & Malagón Rodríguez, 2019.

Compactación

Este proceso no implica una transformación del material, sino una reducción de su volumen, facilitando el almacenamiento y transporte de estos. La compactación se suele aplicar a residuos plásticos como envases, y es muy común su uso en botellas PET. Con el fin de garantizar la calidad del material, antes de la compactación es indispensable realizar la limpieza de las botellas plásticas retirando las tapas, etiquetas y anillos, y si es posible se pasan los residuos por un proceso de lavado (Naranjo Tabaco, 2016). Como ya se ha mencionado es indispensable la clasificación del PET por colores, antes de encapsularlos en una prensa o compactadora.

En la compactación se usan máquinas que reducen el tamaño de los plásticos mediante la aplicación de fuerza, y esto puede conllevar a una reducción de costos en el almacenamiento y transporte, y usualmente estos compactadores trabajan con sistemas hidráulicos (Hernández Márquez, 2017). En centros de reciclaje este proceso se realiza principalmente en compactadoras mecánicas o manuales. Para

el caso del reciclaje de las botellas PET, lo ideal es que la compactación se realice desde el sitio que se genera la utilización de botella reduciendo gastos de transporte y de almacenaje hacia dichos centros (Tipán, Mora, & Altamirano, 2019).

Los mecanismos de compactado son diversos como por ejemplo de rodillos, superficies planas y con prensas hidráulicas. En la compactación con rodillos existen diversas máquinas, en las cuales generalmente se emplean uno o dos rodillos y estos pueden o no tener púas o garras que arrastran las botellas y en el estrechamiento las compactan para luego caer por gravedad al lugar de almacenamiento (Hernández Márquez, 2017). En los compactadores de un solo rodillo la compactación ocurre entre una superficie estática que sirve de apoyo y el rodillo, y estos suelen optimizar más espacio que los de dos rodillos. La compactación con rodillos no es muy común.

Figura 31. *Compactadoras de rodillos para botellas PET.*

Fuente: Tomado de Tapia Lemos, 2018.

Sin embargo, el tipo de compactación más implementado es el uso de prensas, dentro de las que se encuentran principalmente de tres tipos: prensa manual, prensa hidráulica vertical y prensa hidráulica horizontal. Las compactadoras mencionadas anteriormente funcionan de manera similar, la diferencia radica en que, la manual suele tener un volante en la parte superior que acciona manualmente la prensa cuando se gira este volante, mientras que, las compactadoras hidráulicas, son accionadas manualmente pero no requieren gran esfuerzo ya que el motor eléctrico acciona el gato hidráulico que mueve finalmente la placa que compacta el material (Tapia Lemos, 2018).

Figura 32. *Diferentes tipos de compactadoras por prensado: A) prensa manual, B) prensa hidráulica vertical y C) prensa hidráulica horizontal.*

Fuente: Imágenes tomadas de: A) Tapia Lemos, 2018, B) Alibaba.com y C) SoloStocks Colombia.

Si bien la prensa o compactadora de tipo manual parece ser una opción más económica y accesible, en Colombia no es muy común esta maquinaria. Las prensas hidráulicas verticales suelen ser más comunes puesto que a diferencia de las horizontales son más pequeñas y ocupan menos espacio.

Molienda, triturado o cortado

Los residuos de plástico PET como botellas y envases se caracterizan por tener mucho volumen y poca densidad, es decir, ocupan mucho espacio y pesan poco. Mediante este proceso, se reduce el tamaño de los residuos plásticos obteniendo un material homogéneo, de forma similar. Con ello se facilitan otros procesos que se deseen realizar como la limpieza. El triturado es un proceso indispensable en el reciclaje mecánico, y antecede otros procesos de reciclaje de plástico como la extrusión y el peletizado.

Existen diversos tipos de tecnologías y maquinarias dependiendo del tamaño al cual se quiere llegar. Según el diseño y tipo de molino que se emplee se pueden obtener hojuelas de media, un cuarto de pulgada o finalmente polvo (Patzi Canaza, 2015). Las máquinas trituradoras tienen un funcionamiento sencillo, además de que son fáciles de operar, el plástico se tritura y almacena en la tolva con tan sólo presionar un botón (Baño Martí, Qué son las máquinas trituradoras de plásticos y para qué sirven, 2019). Este tipo de maquinarias para el triturado o molienda de plástico pueden ser adquiridas fácilmente en el mercado, o bien pueden ser diseñadas según las necesidades del usuario.

De acuerdo con Caviedes Aguirre (2020), los molinos de cuchillas son los que más se utilizan para la trituración de botellas PET. Este tipo de molinos cuentan con una tolva de alimentación, ubicada en la parte superior del molino. Posteriormente, se encuentra la tobera, la cual dispone el PET directamente en la cámara de corte. Existen diferentes tipos de sistemas de cuchillas rotatorias para realizar el corte o la trituración, como el sistema de cuchillas de corte oblicuo, que realiza cortes suaves y limpios, y las cuchillas no son totalmente rectas puesto que tienen una curvatura; estas se encuentran en porta cuchillas, que van fijos en un eje rotatorio impulsado por un motor eléctrico, que conduce su potencia mediante poleas (Caviedes Aguirre, 2020).

Figura 33. *Molino de cuchillas rotatorias para trituración de PET.*

Fuente: Interempresas, recuperado de Caviedes Aguirre, 2020.

De acuerdo con Baño Martí (2021), existen diversos elementos que se deben tener en cuenta en el molino de trituración de plástico, entre estos se encuentran:

- Boca de entrada: el tamaño de esta puede indicar si el molino podrá albergar volúmenes más pequeños o grandes, así mismo, puede variar según el tipo de material que se va a triturar (Baño Martí, 2021).

Figura 34. *Algunos tipos de molinos trituradores de plástico.*

Fuente: Interempresas (Baño Martí, Molinos trituradores ¿cómo elegir el más adecuado?, 2021).

- Cuchillas: este es uno de los factores más importantes a considerar, puesto que de estas depende la eficiencia del cortado o trituración. Si las cuchillas están poco afiladas, en malas condiciones o incluso mal ajustadas, pueden incrementar el consumo de electricidad y disminuir la producción. El número de cuchillas puede variar según las necesidades de triturado (Baño Martí, 2021).

Figura 35. *Algunos tipos de cuchillas empleadas en trituradores de plástico.*

Fuente: Interempresas (Baño Martí, Molinos trituradores ¿cómo elegir el más adecuado?, 2021).

- Electricidad y control: en el mercado existen diversas alternativas de molinos más modernos, con avances como control remoto, contabilidad de los procesos diarios, amortiguación acústica para reducir el ruido, sistemas automatizados, etc. (Baño Martí, 2021). Que pueden optimizar el proceso de triturado, facilitar la operación del equipo, pero que pueden acarrear costos económicos.

- Tamaño: este determina el espacio que ocupará la infraestructura y su capacidad de recepción y procesamiento de material.

Luego del molido, se suele hacer un lavado del material. Para ello se suele utilizar agua, sosa diluida y/o tensoactivos y este proceso puede hacerse a diversas temperaturas: lavado a temperatura ambiente o normalmente conocido como lavado en frío, lavado medio a 40°C y lavado en caliente en valores de 70 a 90°C (Guerrero Contreras, 2018). Para el proceso de lavado y secado también existen diversas tecnologías como centrífugas y secadores.

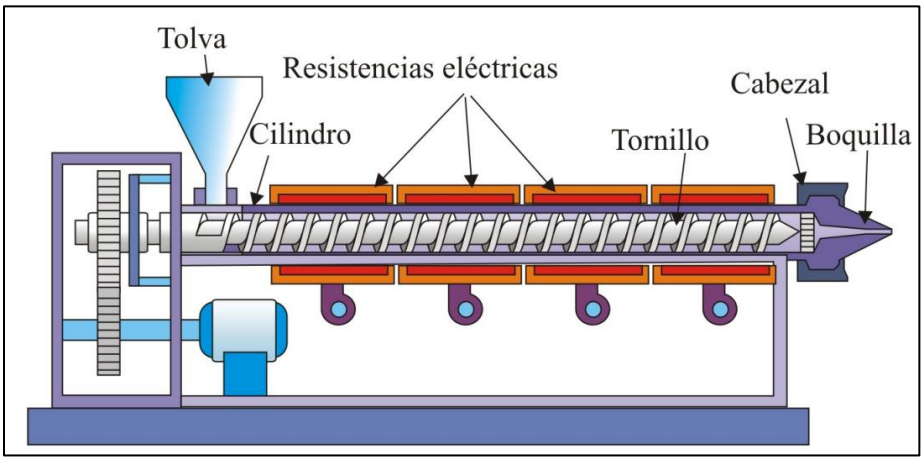
Extrusión

Esta es una técnica de procesamiento en la que las resinas plásticas se funden, calientan y bombean. En esta se utiliza un barril con un tornillo giratorio para fundir el plástico que ingresa a la extrusora (Amaya Giraldo & Lamilla Cabrera, 2018). En este proceso, el plástico se empuja o se extrae de un troquel, formando hebras que luego se granulan o se funden para crear nuevos productos plásticos, para ello, se usa un solo tipo de polímero (Castañeda Ramírez & Miranda Pérez, 2018).

Todos los termoplásticos, incluido el PET, pueden reciclarse por extrusión, y la eficiencia del proceso depende de la homogeneidad de los residuos plásticos a emplear, por lo que estos deben estar separados y limpios, libres de contaminantes como polvo, aceite y productos químicos. Para obtener productos de alta calidad se requiere un mínimo de 20 a 30% de plástico virgen junto con un 70% de plástico recuperado (Onogawa et al., 2021).

En términos generales, en la extrusión, un material fundido es forzado a atravesar una boquilla para producir un artículo de sección transversal constante. Para esto se emplea una extrusora, que comúnmente realiza seis funciones principales: transporte del material sólido hacia la zona de fusión, fusión o plastificación del material, bombeo y presurización del fundido, mezclado, desgasificado y conformado (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012). Existen diversos tipos de extrusoras, se pueden encontrar de dos tornillos, pero las más utilizadas son las de tornillo o de husillo simple como la que se muestra a continuación:

Figura 36. *Esquema de una extrusora de husillo sencillo*.



Fuente: Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012.

La extrusión en general se realiza posteriormente a la trituración del plástico. Los trozos de material se introducen en la extrusora a través de una tolva, en esta etapa se pueden incorporar aditivos como

colorantes e inhibidores UV que se mezclan con los gránulos en la tolva. Posteriormente ingresa a un tornillo giratorio que empuja el material a través del barril o cilindro, donde se va calentando a la temperatura de fusión deseada. El calentamiento se realiza de manera gradual de modo que los trozos plásticos se derriten paulatinamente mientras son empujados a través del barril, lo que reduce el riesgo de sobrecalentamiento (Onogawa et al., 2021).

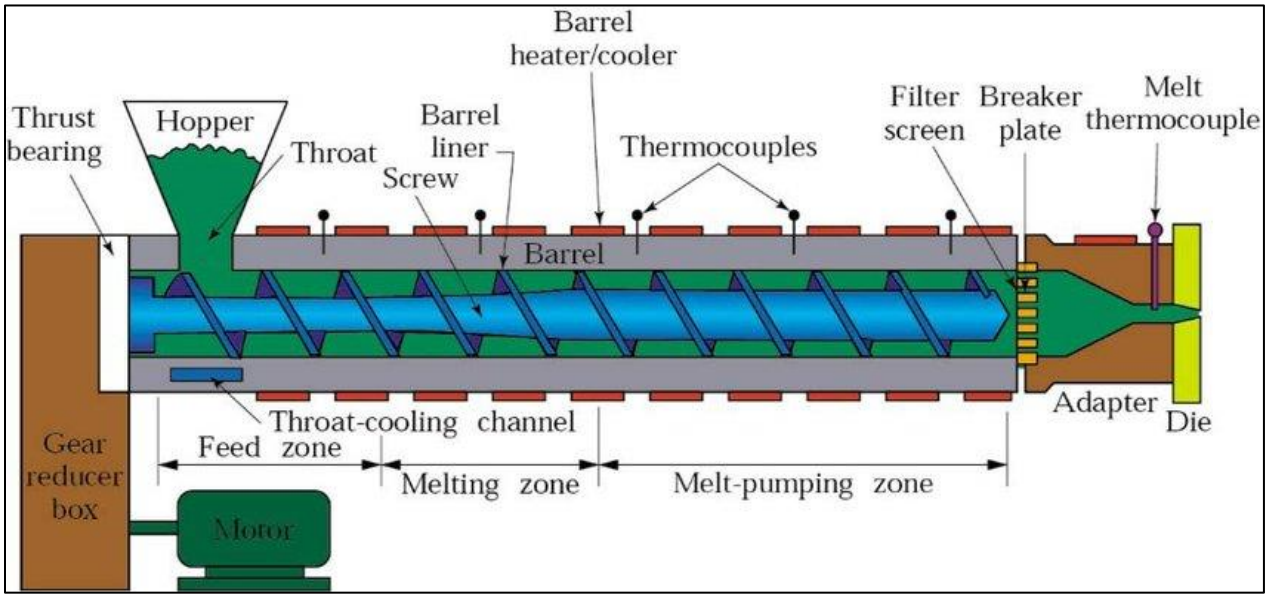
El barril y el tornillo son las partes más importantes de una extrusora, y a menudo se divide en tres zonas, que se pueden apreciar en la *Figura 37*, y se describen a continuación:

1. *Zona de alimentación* (Feed zone): es la más cercana a la tolva, donde el material ingresado se compacta en una forma sólida densa y se transporta hacia la siguiente zona a una velocidad determinada (Onogawa et al., 2021).

2. *Zona de fusión, de transición o compresión* (melting zone): es la zona intermedia donde se va fundiendo el material. Conforme el material sólido va compactándose en esta zona el aire que pudiera quedar atrapado escapa del material vía la tolva de alimentación (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

3. *Zona de bombeo de fusión o de dosificado* (melt-pumping zone): se sitúa al final, en la parte más cercana a la boquilla. Aquí, el material fundido es homogeneizado y presurizado para forzarlo a atravesar la boquilla de conformado donde adquirirá la forma deseada según el tipo de boquilla empleada (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

Figura 37. *Esquema general de una máquina extrusora de plástico.*



Fuente: Onogawa et al., 2021.

Después de atravesar el tornillo y el barril, y pasar por la boquilla o matriz, el polímero extruido adquiere una forma prescrita. Tan pronto como el extruido sale de la matriz, debe enfriarse y solidificarse, lo que generalmente se logra pasándolo a través de un baño de agua, luego, este debe ser tirado con un extractor y posteriormente se cortado con una máquina de bobinado o corte (Onogawa et al., 2021). Para que el producto extruido conserve la forma y adquiera la rigidez necesaria es importante un óptimo

sistema de enfriamiento. Para ello es necesario un sistema de enfriamiento. El enfriamiento debe ser lo más uniforme posible y en ocasiones también gradual (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

Esto representa una de las principales desventajas de la extrusión, puesto que, para un proceso completo de transformación, además de una extrusora se necesitan equipos auxiliares, principalmente para etapas como refrigeración, calibrado, tensionado, recogida y cortado, que varían según el producto final a generar. A partir de la extrusión, el plástico puede moldearse de diversas maneras obteniendo formas como tubos, láminas, películas, fibras, filamentos, etc. Un ejemplo es la extrusora de dado plano que se muestra a continuación:

Figura 38. *Extrusora de lámina o de dado plano.*

Fuente: TEVA Distribuidora: https://www.maquinariaparaplastico.com/

Este tipo de extrusora cuenta con un dado plano para la producción de películas, film, láminas o planchas de diversos polímeros, dentro de los que se encuentra el PET; estas láminas son usadas para la fabricación de diversos productos termoformados.

Peletizado

Este proceso consistente en la formación de gránulos de material plástico (Amaya Giraldo & Lamilla Cabrera, 2018), mediante la fundición del polímero, que luego es forzado e impulsado a salir bajo presión a través de una matriz metálica denominada “dado” que le confiere forma definida y sección transversal constante, después es enfriado, solidificado y es cortado en pedazos pequeños llamados “pellets” (Patzi Canaza, 2015). Pese a que la peletización consta de un proceso de extrusión en sí, comercialmente las máquinas extrusoras y las peletizadoras, se presentan como tecnologías diferentes.

De acuerdo con Baño Martí (2020), el proceso general de peletización se lleva a cabo en 4 pasos.

2. *Dosificación*: se suministra la materia prima de acuerdo con las proporciones establecidas por el proceso.

3. *Mezclado:* se agrega el vapor de agua y los aditivos necesarios.

4. *Peletización:* se crea la preforma mediante presión y se cortan las porciones.

5. *Secado:* mediante diferentes procesos de secado se elimina el agua contenida en el producto.

En este proceso, se ingresan hojuelas de PET posterior al secado a la peletizadora "donde son impulsadas por un tornillo sin fin a través de paredes con resistencias que calientan el material hasta alcanzar su temperatura de fusión a 260°C (Guerrero Contreras, 2018). Posteriormente el plástico fundido sale por el dado y puede realizarse el corte de dos maneras:

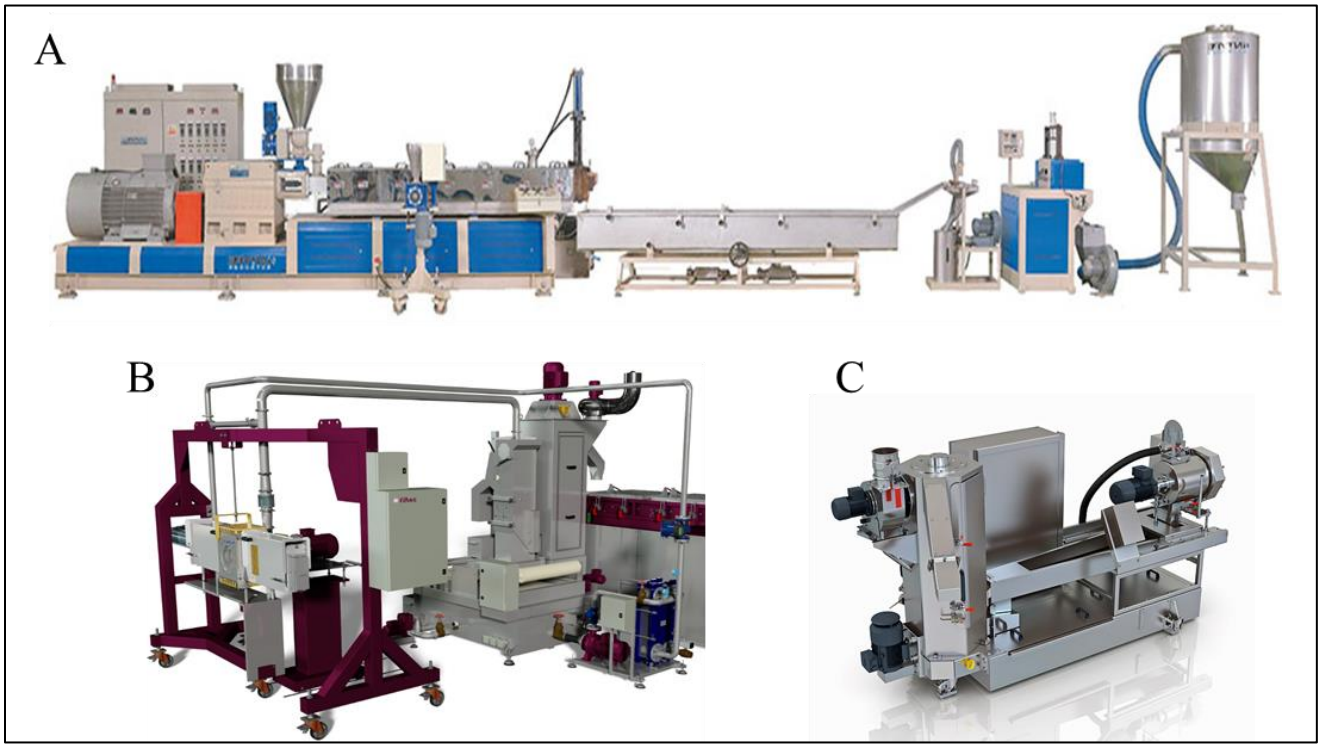
- *Peletizado de corte al frío*: la masa sale de la peletizadora por un cabezal cilíndrico, que la divide en hilos que son ingresados en una tina con agua para disminuir su temperatura y luego ser cortados en pellets alargados con apariencia de pequeños cilindros al final de la línea (Guerrero Contreras, 2018).
- *Peletizado de corte al caliente:* la masa sale por un cilindro o cabezal y luego se corta. Posteriormente los pellets caen a una tina donde se disminuye su temperatura, obteniendo una forma semiesférica (Guerrero Contreras, 2018).

En cuanto a las tecnologías empleadas en el peletizado se destacan principalmente tres tipos (*Figura 40*): peletizadoras de hebras (de corte al frio), que pueden contar con diseños automáticos de manejo de hebras; cortadores de dado que abarcan diseños bajo el agua y el anillo de agua (de corte al caliente) (Colorplastic SAS, 2021). Cada una de estas tiene distintas características de funcionamiento y según la que se emplee se obtiene como resultado final diferentes tipos de pellets, como se observa en la siguiente figura:

Figura 39. *Pellets resultantes de las diferentes tecnologías de peletizado de plástico.*

Fuente: Plastics Technology México (Merritt H., 2019).

Figura 40. *Principales tipos de peletizadoras: A) peletizadora de filamentos, B) peletizadora de corte bajo agua y C) peletizadora de anillo de agua.*



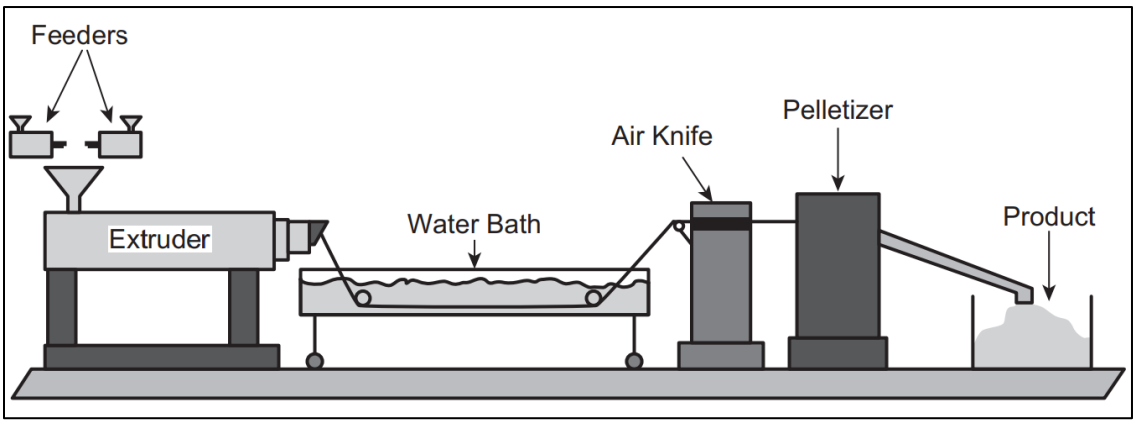
Fuente: Imágenes tomadas de: A) Intype Enterprise Co., Ltd, 2022, B) Mundo Plast, 2021 y C) Filtec, 2022.

A continuación, se describen brevemente las tres principales tecnologías para el peletizado de plástico:

Peletizado de filamentos o hebras:

El polímero fundido pasa a través del cabezal con varios orificios, formando filamentos que luego entran en un baño de agua o en una cubeta, para su enfriamiento y solidificación. Luego se secan y se cortan en pellets cilíndricos, posteriormente, se pasan por un clasificador, que elimina los pellets o aglomerados de gran tamaño (Merritt H., 2019). En la siguiente figura se presenta este proceso:

Figura 41. *Esquema general de una máquina peletizadora de hebras.*



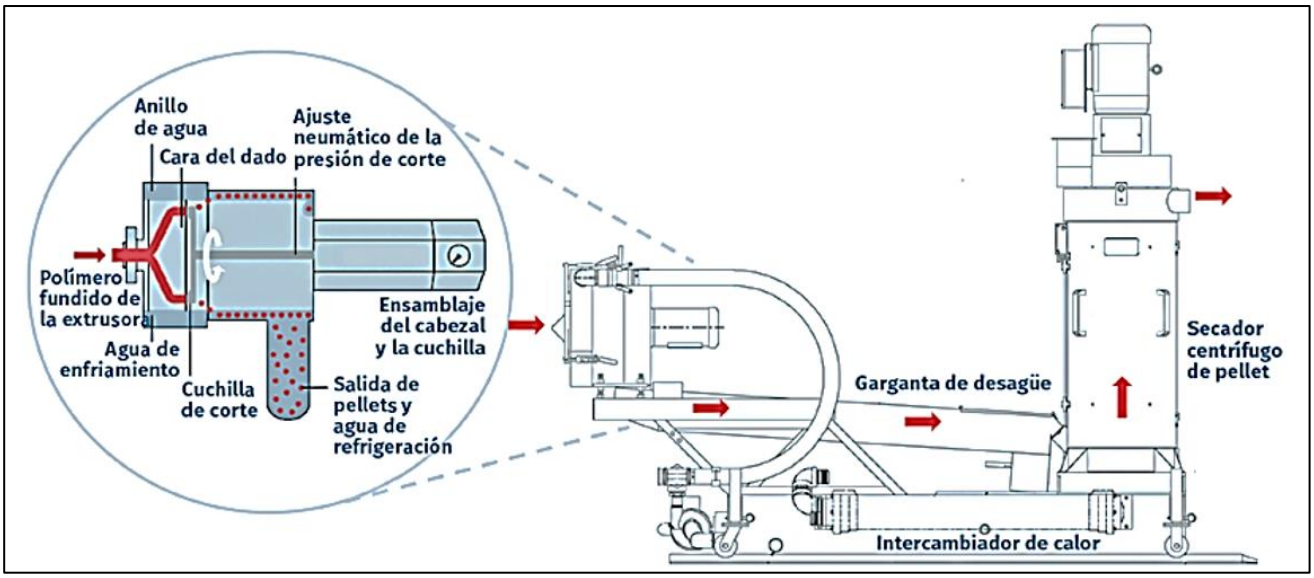
Fuente: Wagner, Mount, & Giles, 2014.

Tal y como se puede apreciar, este tipo de peletizado requiere de: un sistema de alimentación, extrusora, matriz de hebras, baño de agua, cuchilla de aire y peletizadora. Entre el peletizador y el baño de agua se encuentra una cuchilla de aire o separador de aire, que elimina cualquier humedad superficial adherida a la hebra, antes del corte en la peletizadora. La cantidad de hebras empleadas dependen del tamaño de la extrusora y la tasa de rendimiento (Wagner et al., 2014).

Peletizado de anillo de agua:

El polímero fundido pasa a través del cabezal y se corta a medida que sale de este. El corte se realiza mediante una serie de cuchillas giratorias dispuestas en un patrón circular. Los pellets resultantes del corte se lanzan hacia un anillo de agua que los enfría y los transporta a una canal de agua para un mayor enfriamiento, luego pasan a un secador centrífugo. El agua se puede gestionar para su reciclaje en el proceso, siendo devuelta a un sistema de atemperado y filtración (Merritt H., 2019). A continuación, se presenta el esquema de este tipo de peletizado:

Figura 42. *Esquema general de una peletizadora de anillo de agua.*



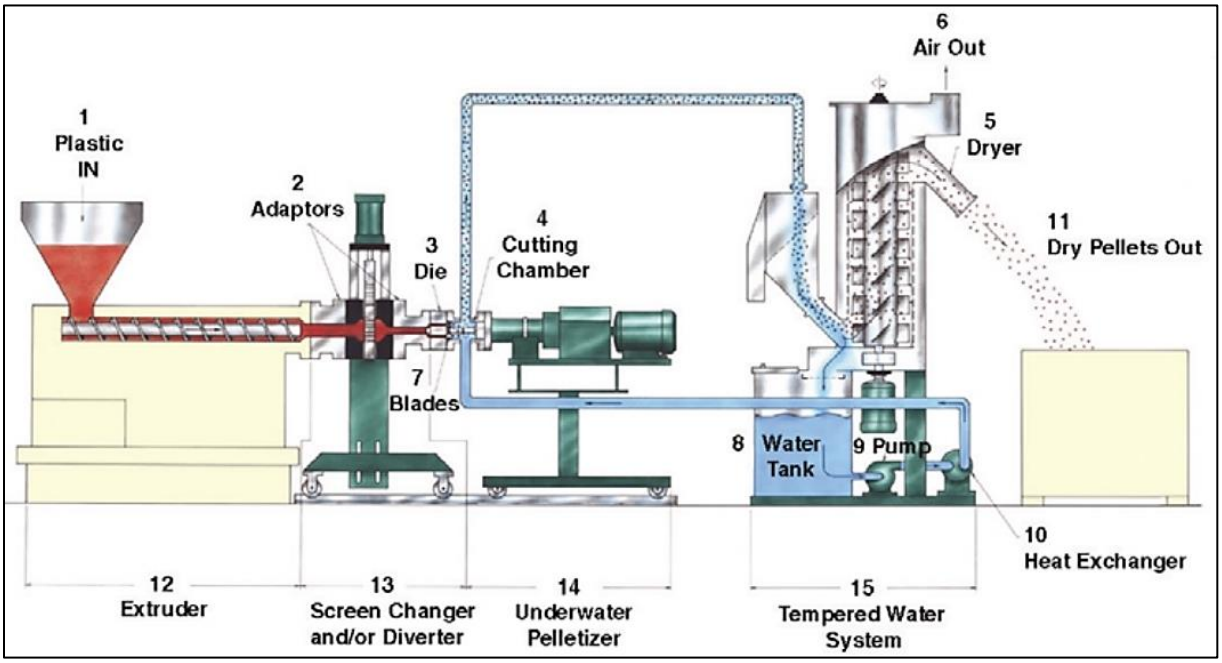
Fuente: Plastics Technology México (Merritt H., 2019).

El polímero fundido fluye mediante orificios circulares del dado o cabezal, luego se corta en pellets a medida que salen de este. El corte se realiza mediante cuchillas giratorias, y este debe contar con una adecuada presión para garantizar un contacto adecuado con la cara del cabezal (Merritt H., 2019).

Peletizado bajo agua:

Se corta el polímero fundido en pellets a medida que sale de los orificios del cabezal, que están dispuestos en un patrón circular. Se diferencia del peletizador de anillo de agua en que, en este, la cámara de corte está completamente llena de agua. Así, las gotas de polímero se sumergen en agua cuando salen de los orificios del cabezal, lo que les otorga a los pellets una forma esférica (Merritt H., 2019). Es el sistema de peletizado más complejo, y de mayor costo de inversión. La siguiente figura muestra un esquema general del proceso:

Figura 43. *Esquema general de una peletizadora bajo agua.*



Fuente: (Markarian, 2004)

Después de corte, los pellets son transportados por el agua hacia un colector de aglomerado (que elimina grumos de plástico) y luego a un secador. Los pellets ingresan por la parte inferior del secador y un eje giratorio con paletas de elevación los seca, los pellets salen por la parte superior de la unidad (Merritt H., 2019). La temperatura del agua se ajusta según las propiedades del polímero empleado para evitar producir pellets mal formados o interrupciones.

En la siguiente tabla se presentan algunas características principales de cada una de las tecnologías de peletizado:

Tabla 18. *Características de los diferentes sistemas de peletizado de plástico.*

	Peletizado de filamentos o de hebras	**Peletizado de anillo de agua**	**Peletizado de corte bajo agua**
Automatización	Poco margen para la automatización. Requiere más mano de obra que otros sistemas de peletizado, pero es el más fácil de usar	Proporciona cierto grado de automatización. Un operador puede controlar fácilmente el sistema	Tiene el mayor potencial de automatización. Pueden preprogramarse funciones como el afilado de las cuchillas y la limpieza del cabezal, minimizando el tiempo de inactividad
Rendimiento	Capacidades cercanas a 44,000 lb / h	Puede abarcar una capacidad de alrededor de 11,000 lb / h	Se pueden diseñar con capacidades hasta de 70,000 lb / h
Costo económico	Costo más bajo de las peletizadoras	Costo inferior a la peletizadora bajo agua	Mayor costo de inversión

Huella (espacio ocupado)	La necesidad de un baño de agua para el enfriamiento implica una huella más grande	Es el más compacto de los tres procesos principales de peletizado	Pequeña en comparación con peletizadoras de filamento
Polvo y finos	Mayor generación que otros sistemas de peletizado, debido al corte en frío.	Baja cantidad, debido al corte del polímero en forma fundida	Baja cantidad, debido al corte del polímero en forma fundida
Versatilidad	Se usan con una amplia gama de polímeros	Principalmente se usa en el procesamiento de materiales de alta resistencia de fundido, como las poliolefinas y el poliestireno	Virtualmente, puede procesar cualquier polímero y puede usarse para una gama completa de aplicaciones

Fuente: Plastics Technology México (Merritt H., 2019).

Los pellets son el material de entrada ideal para procesos de moldeo por inyección, extrusión de perfiles, y mezcladores, donde se reintroducen polímeros recuperados junto con material virgen al proceso (Colorplastic SAS, 2021). Con el moldeo se otorga la forma final del producto plástico, para su reingreso al mercado. De acuerdo con Castañeda Ramírez & Miranda Pérez (2018) dentro de las principales técnicas para el moldeo de plásticos se encuentran:

- *Moldeo por extrusión:* las escamas de los residuos plásticos se funden y extruyen (o se empujan) a través de un molde mediante tornillos simples o gemelos para darle forma y crear un producto. Este proceso se usa para formar tuberías, láminas, películas, revestimiento de cables, entre otros.

- *Moldeo por inyección:* el polímero se funde, y se inyecta caliente en un molde, donde se solidifica formando el producto deseado.

- *Moldeo por soplado:* este proceso se emplea principalmente para fabricar botellas, principalmente aquellas hechas de PET. El plástico fundido se sujeta en un molde, y se infla con aire para hacer botellas para todo tipo de usos.

- *Moldeo por vacío:* una lámina plástica ablandada por calor se coloca en un molde, y luego se sella el espacio entre la lámina y el molde. Esta técnica se emplea para formar productos de poco espesor como tazas y bandejas.

El PET reciclado, por cuestiones de salubridad no se emplea en productos que tengan contacto con alimentos, pero tiene otros usos como envases y empaques, fibras para uso textil, repuestos en la industria mecánica, aislante en circuitos eléctricos, etc.

Otras iniciativas de reciclaje PET

Anteriormente se describieron tecnologías sistematizadas para el tratamiento y transformación de los residuos de plástico PET, en los que se implementan diversas maquinarias que permiten abordar diversos eslabones en la cadena del reciclaje mecánico de este material. Sin embargo, es importante considerar otras opciones para la valorización y el flujo dentro de la economía circular del PET, como el uso de este para nuevos materiales, o alternativas que no necesariamente impliquen el uso de maquinaria y que puedan llegar a ser más accesibles, tales como procesos artesanales o pequeñas ideas de negocio donde

se manufacturan objetos a partir de materiales reciclados que pueden ser comercializados, siendo una alternativa de ingreso económico adicional para las personas que se dedican a esta labor.

Una iniciativa de reciclaje de plástico bastante conocida en el país es la desarrollada por la fundación Botellas de amor, una entidad sin ánimo de lucro que aborda el problema de los residuos plásticos, empleándolos para hacer obras sociales como la donación de viviendas, parques infantiles, mobiliario escolar y mobiliario urbano (Fundación botellas de amor, 2022).

La estrategia de la fundación se basa en la recolección de las "botellas de amor", que son botellas llenadas de residuos plásticos flexibles, como empaques; estos materiales son integrados con materiales posindustriales, y se transforman en materia prima para la industria de fabricación de madera plástica. Constituyendo una alternativa más sostenible que los eco-ladrillos (botellas llenas de residuos que se usa como bloque de construcción), esta iniciativa busca cerrar el ciclo de los residuos plásticos flexibles transformándolos en RPL (Recycled plastic lumber) o madera plástica, para la construcción de estructuras (Robayo, 2019). Las "botellas de amor" son vaciadas y su contenido (plásticos flexibles como el polietileno de baja densidad o el propileno) se emplea para la madera plástica, las botellas, como las PET, que contienen estos materiales son compactadas y comercializadas para la obtención de recursos (Fundación botellas de amor, 2022).

El PET en sí mismo, también se emplea en la elaboración de ***madera plástica***. Este material se produce a base de aserrín o viruta de madera como material de refuerzo y el plástico reciclado como material aglutinante; se caracteriza por una alta versatilidad, por ser fácil de cortar pegar, taladrar y clavar, y a diferencia de la madera es más resistente a daños derivados al clima y la corrosión (Aguilar Barros & Aguilar Barros, 2022). La madera plástica se elabora a partir de la extrusión de material plástico junto con la madera u otro material similar. En el país se han implementado diversos proyectos con este material, y existen diversas empresas y organizaciones que trabajan y comercializan productos elaborados con madera plástica, dentro de las que se destacan la compañía Madera Plástica Colombia Ecológica, Maderplastic, Plastipol S.A, la fundación para la investigación científica y el desarrollo tecnológico Ficidet y Econciencia (Rincón Garzón, Rodríguez Carmona, & Espitia Cubillos, 2016).

Otros ejemplos de transformación de este tipo se encuentran en la red de empresas sostenibles RedES-CAR, donde se trabaja con empresas como Greenplastic que hace extrusión para producir madera plástica y mobiliario con estas maderas, y Recipet que hace escamas y pellets de PET reciclado. En el país es muy conocida ENKA, una empresa líder en la recuperación y reciclaje de botellas PET para transformarlas en resinas y fibras textiles.

Debido a las características físicas del PET, como su maleabilidad, permeabilidad y resistencia, además de ser un termoplástico que puede ser fácilmente fundido y moldeado incluso mediante moldes en madera, metal, cerámica, barro, yeso, entre otros, este material también se ha implementado para elaboración de productos artesanales o a modo de manualidades, que si bien no son procesos sistematizados, eficientes y a gran escala si pueden constituir una actividad de ingreso adicional a las poblaciones, además de que contribuye a alargar el ciclo de vida de los residuos plásticos.

Residuos como las botellas de PET pueden ser empleados sin transformaciones o modificaciones como estructuras de mobiliario, cojines, canaletas, tejas, uniones, etc. El material en este estado, generalmente se trabaja con herramientas de corte simples como tijeras o bisturí, o se unen las estructuras con tornillos, tuercas, pistolas de calor, pegamento, entre otros (Rivera Villar, 2019). Mediante estas actividades se crean artesanías y manualidades como aretes, joyas, macetas, accesorios, etc.

Por otro lado, también se puede modificar la forma del material mediante el triturado y fundición manuales para su moldeado, lo que permite elaborar diversidad de objetos. El plástico fundido puede adaptarse a todo tipo de formas, esto permite laminar el material, crear formas sólidas, curvar el material, hacer herramientas, chaflanes, etc. (Rivera Villar, 2019). Sin embargo, los procesos de calentamiento de plástico pueden emitir gases contaminantes y generar riesgos para la salud.

8.2 Priorización de las tecnologías más acordes al contexto del reciclaje en Suba para la transformación del plástico PET

8.2.1 Selección de criterios de calificación y comparación

Con el propósito de identificar las tecnologías para el tratamiento y la valorización del plástico PET, se definieron nueve criterios de evaluación desde la sostenibilidad, que se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 19. *Criterios para la priorización de tecnologías para transformación de PET.*

Dimensión	Criterio	Definición de criterio
Económica	Eficiencia y cantidad de productos generados	¿Cuánto del material ingresado es realmente transformado? ¿Cuántos productos se generan de la transformación del plástico PET?
	Inversión e infraestructura requerida	¿Cuáles son las inversiones iniciales que se deben asumir para implementar la tecnología? ¿Qué requerimientos de espacio, cimientos, soportes, etc., se requieren para la implementación?
	Mano de obra requerida	¿Qué tipo de personal se necesita? ¿Se requiere de habilidades técnicas y operativas específicas para la tecnología? ¿Personal técnicamente cualificado, experimentado, altamente calificado, o no necesariamente calificado?
	Idoneidad técnica y tecnológica	Se refiere al estado de desarrollo de la tecnología, es decir, si la tecnología está disponible y es practicada ampliamente, o está bien establecida en el país o si es una tecnología emergente.
Ecológico	Residuos y/o emisiones generados	Subproductos generados por la implementación de la tecnología, que puedan afectar el ambiente.
	Consumo de recursos	Recursos como agua, electricidad o combustible se requieren para el funcionamiento de la tecnología.
	Ciclos cerrados	¿De qué manera la tecnología contribuye a cerrar los ciclos del PET?, reintegrándolo al sistema productivo, dentro de los principios de la economía circular.
Social	Beneficios	¿Qué tanto la implementación de la tecnología garantiza la mejora de la calidad de vida de las personas y cuál es la probabilidad de aumentar los ingresos?
	Salud y seguridad en el trabajo	¿Qué elementos de protección personal y otras medidas de seguridad se requieren para el manejo de la tecnología? ¿A que riesgos físicos o químicos se enfrentarían las personas con esta tecnología?

Fuente: Elaboración propia.

Los criterios anteriores se definieron dentro de las tres dimensiones del desarrollo sostenible. Donde, la dimensión económica aborda temas referentes al uso eficiente de los recursos, la producción más limpia y el mejoramiento de la competitividad en los mercados (Riestra, 2018). Dentro de esta dimensión se determinaron cuatro criterios pensados desde el contexto socioeconómico de la población recicladora de Suba, la eficiencia de la tecnología a implementar y la disponibilidad y accesibilidad a estas.

En segundo lugar, se tiene la dimensión ecológica o ambiental, desde la cual se busca proteger, preservar y aprovechar racionalmente los recursos de la naturaleza, considerando la capacidad de resiliencia de los ecosistemas (Riestra, 2018). Desde este aspecto los criterios se orientaron a los impactos que pueden causar al ambiente las alternativas a evaluar.

Por último, se tiene la dimensión social, que engloba el elemento social y cultural, y donde el desarrollo sostenible busca la equidad en la distribución y el acceso a los recursos y oportunidades, procurando el desarrollo y la satisfacción de las necesidades de los pueblos (Riestra, 2018). Los criterios dentro de esta dimensión se plantearon desde la contribución de los procesos o tecnologías de tratamiento y valorización del PET en el bienestar de la población recicladora.

8.2.2 Coeficientes de importancia Relativa (CIR) de cada criterio

Una vez definidos los criterios se procede a obtener los coeficientes de importancia relativa que definirán el peso de cada criterio dentro de la decisión. Para ello, primero se tiene la matriz de comparación pareada entre criterios donde se califica según la escala se Saaty (ver *Tabla 17*).

Tabla 20. *Matriz de calificación de criterios según la metodología AHP.*

	Eficiencia	Inversión e infraestructura	Mano de obra	Idoneidad	Residuos y/o emisiones	Consumo de recursos	Ciclos cerrados	Beneficios	SST
Eficiencia	1	1/3	1/2	1	1	1	3	2	1/2
Inversión e infraestructura	3	1	3	1	2	2	3	3	2
Mano de obra	2	1/3	1	1/2	2	1/2	3	1/2	1
Idoneidad	1	1	2	1	1/2	1	3	1/2	1
Residuos y/o emisiones	1	1/2	1/2	2	1	2	3	2	2
Consumo de recursos	1	1/2	2	1	1/2	1	3	2	1/2
Ciclos cerrados	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1	1/3	1/3
Beneficios	1/2	1/3	2	2	1/2	1/2	3	1	1
SST	2	1/2	1	1	1/2	2	3	1	1
SUMA	**11,83**	**4,83**	**12,33**	**9,83**	**8,33**	**10,33**	**25,00**	**12,33**	**9,33**

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente se realizó la normalización de la matriz anterior, y se hicieron los cálculos correspondientes para obtener el porcentaje de peso de cada uno de los criterios previamente definidos. La matriz normalizada se presenta a continuación:

Tabla 21. *Matriz normalizada para definir el peso de cada criterio.*

	Eficiencia	Inversión e infraestructura	Mano de obra	Idoneidad	Residuos y/o emisiones	Consumo de recursos	Ciclos cerrados	Beneficios	SST	CIR o peso	Peso del criterio (%)
Eficiencia	0,08	0,07	0,04	0,1	0,12	0,1	0,12	0,16	0,05	0,09	9%
Inversión e infraestructura	0,25	0,21	0,24	0,1	0,24	0,19	0,12	0,24	0,21	0,20	20%
Mano de obra	0,17	0,07	0,08	0,05	0,24	0,05	0,12	0,04	0,11	0,10	10%
Idoneidad	0,08	0,21	0,16	0,1	0,06	0,1	0,12	0,04	0,11	0,11	11%
Residuos y/o emisiones	0,08	0,1	0,04	0,2	0,12	0,19	0,12	0,16	0,21	0,14	14%
Consumo de recursos	0,08	0,1	0,16	0,1	0,06	0,1	0,12	0,16	0,05	0,10	10%
Ciclos cerrados	0,03	0,07	0,03	0,03	0,04	0,03	0,04	0,03	0,04	0,04	4%
Beneficios	0,04	0,07	0,16	0,2	0,06	0,05	0,12	0,08	0,11	0,10	10%
SST	0,17	0,1	0,08	0,1	0,06	0,19	0,12	0,08	0,11	0,11	11%
TOTAL										1	100%

Fuente: Elaboración propia.

8.2.3 Jerarquización de los criterios según su porcentaje de peso

Como producto de la anterior matriz se obtuvo la siguiente tabla, donde se presentan los nueve criterios de evaluación ordenados de mayor a menor según su porcentaje de peso. Es decir, que los criterios con mayor peso son los que más incidencia tienen en la decisión final.

Tabla 22. *Criterios ordenados de mayor a menor según su peso de importancia.*

Criterio	Peso (%)
Inversión e infraestructura requerida	20%
Residuos y/o emisiones generadas	14%
Idoneidad técnica y tecnológica	11%
Salud y seguridad en el trabajo	11%
Mano de obra requerida	10%
Consumo de recursos	10%
Beneficios sociales	10%
Eficiencia y cantidad de productos generados	9%
Ciclos cerrados	4%

Fuente: Elaboración propia.

El criterio de mayor peso fue el de inversión e infraestructura requerida. Este criterio es fundamental para la decisión de la tecnología más acorde a las condiciones del reciclaje de oficio de Suba, puesto que aborda los costos económicos para la adquisición de la tecnología y sus requerimientos de infraestructura.

Los residuos y/o emisiones generados, fueron el segundo criterio de mayor relevancia, puesto que este permite evaluar la sostenibilidad del proceso o tecnología, desde los impactos negativos que puedan generar, pese a contribuir a la actividad de reciclaje.

Los demás criterios tuvieron peso y relevancia similar, excepto el de ciclos cerrados, que fue el de menor valor, porque en comparación con los demás criterios no es tan importante, al momento de evaluar las tecnologías, porque todas ellas contribuyen al reciclaje del plástico PET, y el reciclaje es una forma de valorización de residuos dentro de la economía circular, lo que necesariamente implica una contribución al cierre de ciclos de materiales.

Otro criterio que obtuvo un bajo peso fue el de eficiencia y cantidad de productos generados, principalmente porque en las comparaciones pareadas realizadas en las matrices para decidir el peso, se favorecieron los criterios que permiten identificar la accesibilidad, la complejidad y los requerimientos de las tecnologías, que el rendimiento de las mismas.

8.2.4 Opciones de decisión (alternativas a priorizar)

A partir de la revisión realizada como resultado del primer objetivo, se seleccionaron cinco tecnologías que son comunes y relevantes dentro del reciclaje mecánico del plástico PET: compactación, trituración, peletización (de filamentos y anillo de agua) y extrusión, para su evaluación según los criterios definidos. En las siguientes tablas se presentan las características de estas tecnologías respecto a cada uno de los criterios:

Tabla 23. *Evaluación del proceso de compactación vertical respecto a los criterios.*

Alternativa 1: Compactadora vertical		
Dimensión	**Criterio**	**Justificación**
Económica	Eficiencia y cantidad de productos generados	Este proceso no transforma el material, solo reduce el volumen de los residuos de PET, como botellas para facilitar su manejo.
	Inversión e infraestructura requerida	A nivel de espacio, este tipo de compactadoras son las que menos ocupa. En cuanto a inversión, existe una variedad de modelos y precios; se pueden encontrar equipos desde un valor de cuatro millones de pesos hasta más de veinte millones.
	Mano de obra requerida	La maquinaria es de fácil implementación, por lo que no se requiere que el personal esté altamente calificado.
	Idoneidad técnica y tecnológica	Es una tecnología consolidada y es ampliamente implementada.
Ecológico	Residuos y/o emisiones generados	No genera emisiones de forma directa.
	Consumo de recursos	Consumo de electricidad

	Ciclos cerrados	El proceso no genera un producto final diferente, por lo que no aporta significativamente en un avance en la cadena del reciclaje de plástico.
Social	Beneficios	No genera un producto de valor agregado, solo facilita procesos como transporte y almacenamiento, por lo que no hay beneficios económicos adicionales ni significativos.
	Salud y seguridad en el trabajo	La máquina no es de gran complejidad y no requiere de medidas especiales, sin embargo, por precaución es importante contar con señalización y equipos de protección personal.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 24. *Evaluación del proceso de triturado respecto a los criterios.*

Alternativa 2: Trituradora		
Dimensión	**Criterio**	**Justificación**
Económica	Eficiencia y cantidad de productos generados	Se reduce el material al cortarlo en pequeños trozos lo que es ideal como materia prima para otros procesos. Transforma casi la totalidad del material ingresado; se presentan algunas pérdidas en polvo y finos. El tamaño de los trozos varía según la trituradora empleada, así como también la capacidad de trituración.
	Inversión e infraestructura requerida	Este tipo de tecnología ocupa poco espacio. Existen diversidad de precios para las trituradoras, que pueden ir desde más de cinco millones de pesos
	Mano de obra requerida	La maquinaria es de fácil implementación, por lo que no se requiere que el personal esté altamente calificado.
	Idoneidad técnica y tecnológica	Es una tecnología consolidada y es ampliamente implementada.
Ecológico	Residuos y/o emisiones generados	No genera emisiones de forma directa, pero si se pueden generar polvos y finos.
	Consumo de recursos	Consumo de electricidad.
	Ciclos cerrados	El triturado es un paso importante para el moldeo del plástico, por lo que, pese a que no constituye un producto final en sí, puede ser comercializado como materia base de otros procesos de transformación de plástico
Social	Beneficios	El plástico PET obtiene un valor agregado y puede ser comercializado a un precio. De igual forma se facilitan los procesos de almacenamiento y transporte del material. Según Benavides Marroquín (2021), el precio de compra de PET molido oscila entre $2.100 y $2.500 por kg (aprox. 0,44 USD).
	Salud y seguridad en el trabajo	La máquina no es de gran complejidad y no requiere de medidas especiales, sin embargo, por precaución es importante contar con señalización y equipos de protección personal.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 25. *Evaluación del proceso de peletización de filamentos o hebras respecto a los criterios*.

Alternativa 3: Peletizadora de filamentos		
Dimensión	**Criterio**	**Justificación**
Económica	Eficiencia y cantidad de productos generados	Genera pellets de forma cilíndrica, cuyo tamaño depende del tipo de cabezal que se emplee. La cantidad de filamentos generados varía según el diámetro del cabezal. Las tasas típicas de producción de hebras oscilan entre 25 y 125 lb/h para un cable de 1/8 in (3,2 mm) de diámetro y de 12 a 70 lb/h para un cable de 3/32 in (2,5 mm) de diámetro (Wagner et al., 2014). En términos generales, la peletizadora transforma en su mayoría el material ingresado; se presentan algunas pérdidas en polvo y finos debido al corte en frío.
	Inversión e infraestructura requerida	En cuanto a infraestructura, esta peletizadora ocupa bastante espacio (puede ser hasta de 15 m de largo o más), como se observa en la *Figura 41*, esta cuenta con sistemas de fundido, enfriamiento, secado y corte. Pese a ser el tipo de peletizadora más económica, requiere una inversión alta, que puede ir desde $ 38.000.000 (aprox. 7.900 USD) (Suarez Sánchez, 2013) hasta más de 100 millones de pesos (más de 20.000 USD) (Guerrero Contreras, 2018), según el modelo que se adquiera.
	Mano de obra requerida	Estas peletizadoras no suelen estar tan automatizadas como otras tecnologías y requiere más mano de obra, por ejemplo, para la alineación de los filamentos (Merritt H., 2019), por lo que las personas deben contar con cierta capacitación para su manejo.
	Idoneidad técnica y tecnológica	La peletizadora de filamentos o hebras es una tecnología consolidada, y es la más común de las tecnologías de peletizado.
Ecológico	Residuos y/o emisiones generados	Debido al corte en frio se pueden producir residuos de polvo y finos, también se pueden liberar algunos gases durante la fusión del material.
	Consumo de recursos	Dentro de los recursos que requiere este tipo de peletizadora se destaca principalmente la energía eléctrica para el funcionamiento de los equipos y agua que es bombeada constantemente para el enfriamiento de los filamentos.
	Ciclos cerrados	Los pellets producidos, en sí mismos pueden ser un producto final que puede ser comercializado con facilidad en el mercado, ya que son un óptimo material de base para procesos de termoformado de plástico.
Social	Beneficios	Los pellets pueden ser vendidos a un precio superior que el plástico recuperado y sin transformar, lo que se traduce en mayores ganancias. De acuerdo con Guerrero Contreras (2018), el precio de los pellets puede estar alrededor de $ 4.000 /kg o más (aprox. 0,84 USD).

	Salud y seguridad en el trabajo	Debido a las grandes dimensiones de este equipo es importante contar con adecuada señalización, equipos de protección personal y considerar los riesgos del uso de este.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 26. *Evaluación del proceso de peletización de anillo de agua respecto a los criterios.*

Alternativa 4: Peletizadora de anillo de agua		
Dimensión	**Criterio**	**Justificación**
Económica	Eficiencia y cantidad de productos generados	Se producen pellets de forma redonda y plana, como pastillas. El tamaño depende del tipo de cabezal que se emplee. Se transforma la mayor parte del material ingresado y las pérdidas en polvo y finos son muy pocas debido al corte en caliente. La capacidad varía según el modelo empleado y el diámetro del pellet, por ejemplo, entre 200-250 kg/h para diámetros de 85 mm, entre 300-400 kg/h para 100 mm, y entre 500-600 kg/h para 120 mm de diámetro (Intype Enterprise Co, 2022).
	Inversión e infraestructura requerida	Si bien, esta es la tecnología de peletizado que menos espacio ocupa, requiere de una óptima área de trabajo. En cuanto a inversión, esta tecnología es más costosa que el peletizado de filamentos.
	Mano de obra requerida	Este equipo cuenta con cierto grado de automatización. De acuerdo con Merritt H. (2019) “un operador puede controlar fácilmente el sistema, usando un control de botón pulsador para detener e iniciar el sistema”.
	Idoneidad técnica y tecnológica	Es una tecnología consolidada, pero no es muy común.
Ecológico	Residuos y/o emisiones generados	Se pueden liberar algunos gases durante la fusión del material. Los residuos de polvo y finos son muy pocos por el corte en caliente.
	Consumo de recursos	Se consume principalmente la energía eléctrica para el funcionamiento de los equipos y agua para el enfriamiento y transporte de los filamentos.
	Ciclos cerrados	Los pellets producidos, en sí mismos pueden ser un producto final que puede ser comercializado con facilidad en el mercado, ya que son un óptimo material de base para procesos de termoformado de plástico.
Social	Beneficios	Los pellets pueden ser vendidos a un precio superior que el plástico recuperado y sin transformar, lo que se traduce en mayores ganancias. Según Guerrero Contreras (2018), el precio de los pellets puede estar sobre los $4.000/kg (aprox. 0,84 USD).
	Salud y seguridad en el trabajo	Debido a las grandes dimensiones de este equipo es importante contar con adecuada señalización, equipos de protección personal y considerar los riesgos del uso de este.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 27. *Evaluación del proceso de extrusión de láminas respecto a los criterios.*

Alternativa 5: Extrusora de dado plano		
Dimensión	**Criterio**	**Justificación**
Económica	Eficiencia y cantidad de productos generados	Este tipo de extrusora produce láminas de PET. Se requiere de cierta cantidad de plástico virgen (al menos un 30%) para obtener productos de alta calidad. La capacidad puede variar de entre 200 a más de 300 kg/h (TEVA Distribuidora, 2022).
	Inversión e infraestructura requerida	La extrusora ocupa bastante espacios, sus dimensiones son de aproximadamente 15 m de largo y más de 2 m de ancho y de altitud (TEVA Distribuidora, 2022). A nivel de inversión, este tipo de tecnología requiere de una alta inversión según el modelo a emplear, variando el costo desde 50 hasta más de 100 millones de pesos.
	Mano de obra requerida	El proceso tiene cierto grado de automatización, pero es importante que el personal cuente con capacitaciones para su adecuado manejo.
	Idoneidad técnica y tecnológica	Es una tecnología consolidada, pero no es muy común. Se suele emplear en grandes industrias.
Ecológico	Residuos y/o emisiones generados	Durante el proceso de fusión se liberan gases, vapores y humos, que pueden tener olores desagradables e incluso ser nocivos para la salud. Para controlar estas emisiones, las extrusoras deben estar equipadas con depuradores (Onogawa et al., 2021).
	Consumo de recursos	Se consume principalmente la energía eléctrica para el funcionamiento de la extrusora y los sistemas; el consumo puede estar entre 100 y 200 kW (TEVA Distribuidora, 2022). El consumo de agua dependerá del sistema de enfriado que se emplee; para las extrusoras de láminas, generalmente se emplea un sistema de rodillos, por lo que el consumo de agua es reducido.
	Ciclos cerrados	Las láminas generadas pueden ser un producto final de comercialización, como base para procesos de termoformado de plástico.
Social	Beneficios	El plástico PET obtiene un valor agregado, las láminas pueden ser comercializadas a un precio superior que el plástico recuperado y sin ningún tratamiento.
	Salud y seguridad en el trabajo	Es importante contar con adecuada señalización, equipos de protección personal y considerar los riesgos del uso de este.

Fuente: Elaboración propia.

8.2.5 Coeficientes de Selección Ambiental (CSA)

Teniendo en cuenta la información de las tablas anteriores se procedió a obtener los CSA a partir de comparaciones pareadas entre cada una de las alternativas descritas respecto a cada uno de los criterios. Esto se muestra en las siguientes matrices.

El primer criterio evaluado fue la inversión e infraestructura requerida. La asignación de puntajes se realizó teniendo en cuenta los costos de la maquinaria, su tamaño y otras implicaciones financieras. La siguiente tabla corresponde a la matriz de evaluación de este criterio:

Tabla 28. *Evaluación de las alternativas respecto al criterio de inversión e infraestructura.*

Criterio 1: Inversión e infraestructura requerida												
						Normalización						
	Compactadora vertical	Trituradora	Peletizadora de filamentos	Peletizadora de anillo de agua	Extrusora de dado plano	Compactadora vertical	Trituradora	Peletizadora de filamentos	Peletizadora de anillo de agua	Extrusora de dado plano	CSA	CSA (%)
Compactadora vertical	1	2	3	4	4	0,43	0,52	0,40	0,32	0,27	0,39	39%
Trituradora	1/2	1	3	4	4	0,21	0,26	0,40	0,32	0,27	0,29	29%
Peletizadora de filamentos	1/3	1/3	1	3	4	0,14	0,09	0,13	0,24	0,27	0,17	17%
Peletizadora de anillo de agua	1/4	1/4	1/3	1	2	0,11	0,07	0,04	0,08	0,13	0,09	9%
Extrusora de dado plano	1/4	1/4	1/4	1/2	1	0,11	0,07	0,03	0,04	0,07	0,06	6%
SUMA	2,33	3,83	7,58	12,5	15	TOTAL					1	100

Fuente: Elaboración propia.

En este primer criterio, las tecnologías más simples como la compactación y la trituración obtuvieron la mayor calificación, de 0,39 y 0,29 respectivamente. Debido a que su principio de funcionamiento no es muy complejo y las maquinarias para estos procesos son sencillas, ocupan poco espacio y son más económicas que otras tecnologías. Para el caso de las peletizadoras y la extrusora, estas requieren diversas infraestructuras adicionales para procesos como el enfriamiento y el corte, además de que las máquinas son de grandes dimensiones por lo que requieren de bastante espacio.

El segundo criterio de mayor peso en la decisión final corresponde a los residuos y emisiones generadas por cada una de las tecnologías a evaluar, lo que refleja en cierto modo el impacto ambiental que puede tener la implementación de estas maquinarias en los procesos de reciclaje. En la siguiente tabla se muestra la matriz de calificación de las alternativas de acuerdo con este criterio:

Tabla 29. *Evaluación de las alternativas respecto al criterio de residuos y emisiones.*

Criterio 2: Residuos y/o emisiones generadas												
						Normalización						
	Compactadora vertical	Trituradora	Peletizadora de filamentos	Peletizadora de anillo de agua	Extrusora de dado plano	Compactadora vertical	Trituradora	Peletizadora de filamentos	Peletizadora de anillo de agua	Extrusora de dado plano	CSA	CSA (%)
Compactadora vertical	1	2	4	4	4	0,44	0,53	0,35	0,40	0,31	0,41	41%
Trituradora	1/2	1	4	4	4	0,22	0,27	0,35	0,40	0,31	0,31	31%
Peletizadora de filamentos	1/4	1/4	1	1/2	2	0,11	0,07	0,09	0,05	0,15	0,09	9%
Peletizadora de anillo de agua	1/4	1/4	2	1	2	0,11	0,07	0,17	0,10	0,15	0,12	12%
Extrusora de dado plano	1/4	1/4	1/2	1/2	1	0,11	0,07	0,04	0,05	0,08	0,07	7%
SUMA	2,25	3,75	11,5	10	13	TOTAL					1	100

Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la generación de residuos y emisiones, nuevamente las tecnologías más simples como la compactación y la trituración obtuvieron un mayor desempeño (con un puntaje de 0,41 y 0,31), porque en comparación con las otras tecnologías generan muy pocos residuos y emisiones, en la trituración se pueden generar polvo y finos resultantes del corte continuo del material. En el caso de las peletizadoras y la extrusora, estas requieren de una etapa de fusión del material para su moldeo, donde el calentamiento y derretimiento del plástico puede implicar la emisión de gases contaminantes e incluso peligrosos para la salud. Ello conlleva a que se requieran constantes monitoreos de emisiones y que como una práctica responsable se implementen mecanismos para el control de emisiones, la limpieza del aire y el control de olores (Onogawa et al., 2021).

Algunos gases generados en el reciclaje mecánico del plástico son el metano, el dióxido de etileno y el dióxido de carbono (Barin, 2021**).** De igual forma, en la peletización y la extrusión se liberan polvos y finos debido al corte de las estructuras resultantes, la peletizadora de agua produce estos en menor cantidad, debido a que el corte se realiza cuando el plástico está fundido y caliente, y no cuando está frío y solidificado.

La siguiente matriz corresponde a la idoneidad técnica y tecnológica, en este criterio obtuvieron una mejor calificación las tecnologías más comunes y mejor establecidas en el mercado.

Tabla 30. *Evaluación de las alternativas respecto al criterio de idoneidad.*

Criterio 3: Idoneidad técnica y tecnológica												
						Normalización						
	Compactadora vertical	Trituradora	Peletizadora de filamentos	Peletizadora de anillo de agua	Extrusora de dado plano	Compactadora vertical	Trituradora	Peletizadora de filamentos	Peletizadora de anillo de agua	Extrusora de dado plano	CSA	CSA (%)
Compactadora vertical	1	1	3	5	5	0,37	0,35	0,40	0,37	0,31	0,36	36%
Trituradora	1	1	3	4	4	0,37	0,35	0,40	0,30	0,25	0,33	33%
Peletizadora de filamentos	1/3	1/3	1	3	4	0,12	0,12	0,13	0,22	0,25	0,17	17%
Peletizadora de anillo de agua	1/5	1/4	1/3	1	2	0,07	0,09	0,04	0,07	0,13	0,08	8%
Extrusora de dado plano	1/5	1/4	1/4	1/2	1	0,07	0,09	0,03	0,04	0,06	0,06	6%
SUMA	2,73	2,83	7,58	13,50	16	TOTAL					1	100

Fuente: Elaboración propia.

Respecto a este criterio, la compactación con un puntaje de 0,36, y la trituración con 0,33 fueron las que mejor desempeño obtuvieron. Esto porque las prensas verticales para la compactación y las trituradoras se encuentran disponibles en el mercado en variedad de diseños, modelos y tamaños, siendo tecnologías accesibles y practicadas ampliamente no solo dentro del reciclaje de plástico PET, sino también de otros tipos de residuos sólidos. Respecto a las demás tecnologías, la peletizadora de filamentos obtuvo un puntaje de 0,17, porque es la tecnología de peletización más común, la que más se implementa y la que es más fácil de adquirir en el mercado.

En la siguiente matriz se presentan las comparaciones pareadas de las alternativas de acuerdo con el criterio de salud y seguridad, el cual está relacionado a la facilidad de manejo, los riesgos del uso y la necesidad de usar elementos de protección personal.

Tabla 31. *Evaluación de las alternativas respecto al criterio de requerimientos en cuanto a salud y seguridad.*

Criterio 4: Salud y seguridad en el trabajo												
						Normalización						
	Compactadora vertical	Trituradora	Peletizadora de filamentos	Peletizadora de anillo de agua	Extrusora de dado plano	Compactadora vertical	Trituradora	Peletizadora de filamentos	Peletizadora de anillo de agua	Extrusora de dado plano	CSA	CSA (%)
Compactadora vertical	1	2	5	5	5	0,48	0,56	0,37	0,42	0,31	0,43	43%

Trituradora	1/2	1	5	5	5	0,24	0,28	0,37	0,42	0,31	0,32	32%
Peletizadora de filamentos	1/5	1/5	1	1/2	2	0,10	0,06	0,07	0,04	0,13	0,08	8%
Peletizadora de anillo de agua	1/5	1/5	2	1	3	0,10	0,06	0,15	0,08	0,19	0,11	11%
Extrusora de dado plano	1/5	1/5	1/2	1/3	1	0,10	0,06	0,04	0,03	0,06	0,06	6%
SUMA	2,1	3,6	14	12	16	TOTAL					1	100

Fuente: Elaboración propia.

Las tecnologías que implican la fundición del material como la extrusión y la peletización obtuvieron calificaciones bajas en este criterio; siendo 0,06 para la extrusora de dado plano, 0,08 para la peletizadora de filamentos y 0,11 para la peletizadora de anillo de agua. Pues al ser tecnologías de mayor complejidad requieren de mayores precauciones para su utilización. La peletizadora de anillo de agua, al ser una tecnología más novedosa y contar con cierto grado de automatización ofrece una mayor seguridad, en comparación con la peletizadora de filamentos y la extrusora de dado plano.

La siguiente matriz corresponde al criterio de mano de obra, que nuevamente se relaciona a la complejidad de la maquinaria. Cuanto más compleja sea, se necesitará que las personas que la operaran estén debidamente capacitadas, y en ocasiones, para procesos de mantenimiento y reparaciones se tendrá que recurrir a personal técnico especializado.

Tabla 32. *Evaluación de las alternativas respecto al criterio de mano de obra requerida.*

Criterio 5: Mano de obra requerida												
						Normalización						
	Compactadora vertical	Trituradora	Peletizadora de filamentos	Peletizadora de anillo de agua	Extrusora de dado plano	Compactadora vertical	Trituradora	Peletizadora de filamentos	Peletizadora de anillo de agua	Extrusora de dado plano	CSA	CSA (%)
Compactadora vertical	1	2	5	4	4	0,45	0,54	0,31	0,41	0,35	0,41	41%
Trituradora	1/2	1	5	4	4	0,23	0,27	0,31	0,41	0,35	0,31	31%
Peletizadora de filamentos	1/5	1/5	1	1/3	1/2	0,09	0,05	0,06	0,03	0,04	0,06	6%
Peletizadora de anillo de agua	1/4	1/4	3	1	2	0,11	0,07	0,19	0,10	0,17	0,13	13%
Extrusora de dado plano	1/4	1/4	2	1/2	1	0,11	0,07	0,13	0,05	0,09	0,09	9%
SUMA	2,2	3,7	16	9,8	12	TOTAL					1	100

Fuente: Elaboración propia.

La peletizadora de filamentos es la tecnología que obtuvo un menor desempeño en este aspecto (con un puntaje de 0,06), puesto que requiere más mano de obra que las demás tecnologías debido a su poco margen de automatización y a su complejidad. Tecnologías como la compactación y la trituración, si bien

no suelen estar tan automatizadas pueden ser empleadas con facilidad y requieren muy poco personal. En todas las tecnologías es importante contar con la supervisión del proceso para su adecuado desarrollo.

En cuanto al criterio de consumo de recursos, si bien todas requieren electricidad para su funcionamiento, los procesos de peletizado y extrusión requieren alcanzar las altas temperaturas para la fundición del material, además de agua para procesos de refrigeración, por lo que obtuvieron calificaciones más bajas, de 0,06 para la extrusora, 0,09 para la peletizadora de anillo de agua y 0,013 para de peletizadora de filamentos. La valoración este criterio se aprecia en la siguiente tabla:

Tabla 33. *Evaluación de las alternativas respecto al criterio de consumo de recursos.*

Criterio 6: Consumo de recursos												
						Normalización						
	Compactadora vertical	Trituradora	Peletizadora de filamentos	Peletizadora de anillo de agua	Extrusora de dado plano	Compactadora vertical	Trituradora	Peletizadora de filamentos	Peletizadora de anillo de agua	Extrusora de dado plano	CSA	CSA (%)
Compactadora vertical	1	1	5	4	5	0,38	0,36	0,46	0,32	0,36	0,38	38%
Trituradora	1	1	4	4	4	0,38	0,36	0,37	0,32	0,29	0,34	34%
Peletizadora de filamentos	1/5	1/4	1	3	2	0,08	0,09	0,09	0,24	0,14	0,13	13%
Peletizadora de anillo de agua	1/4	1/4	1/3	1	2	0,09	0,09	0,03	0,08	0,14	0,09	9%
Extrusora de dado plano	1/5	1/4	1/2	1/2	1	0,08	0,09	0,05	0,04	0,07	0,06	6%
SUMA	2,7	2,8	11	13	14	TOTAL					1	100

Fuente: Elaboración propia.

En la *Tabla 34* se presenta el criterio de beneficios sociales, el cual está encaminado hacia cómo estas tecnologías aportan en la labor del reciclaje a la vez que mejoran la calidad de vida de las personas. Esto se calificó principalmente desde el valor agregado que obtiene el producto final, si puede ser comercializado a un mayor precio en el mercado que el plástico PET recolectado y sin tratar, teniendo un impacto en los ingresos de las personas pudiendo contribuir a mejorar su situación socioeconómica de esta población:

Tabla 34. *Evaluación de las alternativas respecto al criterio de beneficios sociales.*

Criterio 7: Beneficios sociales												
						Normalización						
	Compactadora vertical	Trituradora	Peletizadora de filamentos	Peletizadora de anillo de agua	Extrusora de dado plano	Compactadora vertical	Trituradora	Peletizadora de filamentos	Peletizadora de anillo de agua	Extrusora de dado plano	CSA	CSA (%)

Compactadora vertical	1	1/3	1/4	1/4	1/4	0,06	0,05	0,04	0,06	0,09	0,06	6%
Trituradora	3	1	1/2	1/2	1/2	0,19	0,14	0,09	0,12	0,18	0,14	14%
Peletizadora de filamentos	4	2	1	1/2	1/2	0,25	0,27	0,17	0,12	0,18	0,20	20%
Peletizadora de anillo de agua	4	2	2	1	1/2	0,25	0,27	0,35	0,24	0,18	0,26	26%
Extrusora de dado plano	4	2	2	2	1	0,25	0,27	0,35	0,47	0,36	0,34	34%
SUMA	16	7,3	5,8	4,3	2,8	TOTAL					1	100

Fuente: Elaboración propia.

Así pues, las tecnologías como la peletizadora de anillo de agua que produce pellets de mayor calidad que la de filamentos, y la extrusora de dado plano que produce láminas de PET, obtuvieron mayores calificaciones, siendo de 0,26 y 0,34 respectivamente. Mientras que la menor calificación la obtuvo la compactación con 0,06, que, si bien no implica una transformación significativa del plástico PET, si facilita su manejo al reducir su volumen.

El empleo de tecnologías de mayor complejidad, pese a implicar una inversión y costos económicos más altos, puede contribuir a que el reciclaje se posicione como un negocio inclusivo. De esta manera, la implementación de procesos más complejos en el reciclaje de oficio puede aportar a que desde las empresas, esta población sea más vista y tenida en cuenta como clientes, distribuidores/proveedores y/o socios, generando beneficios mutuos (Ayora Sánchez, Zárate Carabajo, & Jimbo Días, 2020). Donde los recicladores puedan tener acceso a productos y servicios de calidad con precios y pesos justos, para lo cual es fundamental propiciar relaciones de negocio éticas, justas y apoyadas política y gubernamentalmente (Ayora Sánchez et al., 2020).

La siguiente tabla presenta la calificación de las alternativas para el criterio de eficiencia y cantidad de productos generados:

Tabla 35. *Evaluación de las alternativas respecto al criterio de eficiencia y cantidad de productos generados.*

Criterio 8: Eficiencia y cantidad de productos generados												
						Normalización						
	Compactadora vertical	Trituradora	Peletizadora de filamentos	Peletizadora de anillo de agua	Extrusora de dado plano	Compactadora vertical	Trituradora	Peletizadora de filamentos	Peletizadora de anillo de agua	Extrusora de dado plano	CSA	CSA (%)
Compactadora vertical	1	1/3	1/4	1/5	1/5	0,06	0,04	0,04	0,07	0,07	0,05	5%
Trituradora	3	1	1/2	1/3	1/3	0,17	0,11	0,09	0,11	0,11	0,12	12%
Peletizadora de filamentos	4	2	1	1/2	1/2	0,22	0,21	0,17	0,16	0,16	0,19	19%

Peletizadora de anillo de agua	5	3	2	1	1	0,28	0,32	0,35	0,33	0,33	0,32	32%
Extrusora de dado plano	5	3	2	1	1	0,28	0,32	0,35	0,33	0,33	0,32	32%
SUMA	18,00	9,33	5,75	3,03	3,03	TOTAL					1	100

Fuente: Elaboración propia.

En este criterio, las tecnologías de peletizado de anillo de agua y la extrusora de dado plano obtuvieron los CSA más altos, de 0,32, debido a que aprovechan casi la totalidad del material ingresado y además generan productos de mayor calidad y procesamiento. La compactación obtuvo la menor calificación, de 0,05, debido a que esta tecnología no genera un producto más allá de la reducción del volumen de los residuos.

Finalmente, el último criterio considerado es el de los ciclos cerrados, que se muestra en la siguiente matriz. Este se encuentra relacionado con el criterio anterior de eficiencia, y se evaluó desde la facilidad que tiene el producto final de cada tecnología para reintroducirse al ciclo productivo.

Tabla 36. *Evaluación de las alternativas respecto al criterio de ciclos cerrados.*

Criterio 9: Ciclos cerrados												
						Normalización						
	Compactadora vertical	Trituradora	Peletizadora de filamentos	Peletizadora de anillo de agua	Extrusora de dado plano	Compactadora vertical	Trituradora	Peletizadora de filamentos	Peletizadora de anillo de agua	Extrusora de dado plano	CSA	CSA (%)
Compactadora vertical	1	1/3	1/5	1/5	1/5	0,05	0,03	0,04	0,07	0,07	0,05	5%
Trituradora	3	1	1/3	1/4	1/4	0,16	0,08	0,06	0,08	0,08	0,09	9%
Peletizadora de filamentos	5	3	1	1/2	1/2	0,26	0,24	0,18	0,17	0,17	0,21	21%
Peletizadora de anillo de agua	5	4	2	1	1	0,26	0,32	0,36	0,34	0,34	0,33	33%
Extrusora de dado plano	5	4	2	1	1	0,26	0,32	0,36	0,34	0,34	0,33	33%
SUMA	19	12,3	5,53	2,95	2,95	TOTAL					1	100

Fuente: Elaboración propia.

En este sentido, las tecnologías de extrusión y peletización obtuvieron las calificaciones más altas, puesto que generan productos elaborados. Siendo de 0,21 para la peletizadora de filamentos y de 0,33 para la peletizadora de anillo de agua y la extrusora. Mientras que la compactación obtuvo el CSA más bajo, de 0,05 porque no implica una transformación del material para alargar su vida útil o reintroducirlo al ciclo productivo.

8.2.6 Matriz de decisión (relación de los CSA y los CIR)

En la *Tabla 37* se presenta la matriz final de decisión donde se integraron los pesos de los criterios de decisión o coeficientes de importancia relativa (CIR) con los coeficientes de selección ambiental (CSA) de cada alternativa respecto a cada uno de los criterios. Donde la alternativa de mayor valor total es la más viable de implementar.

Tabla 37. *Matriz final de decisión de las alternativas evaluadas.*

		CSA					CIR x CSA				
Criterio	CIR	Alternativa 1: Compactadora vertical	Alternativa 2: Trituradora	Alternativa 3: Peletizadora de filamentos	Alternativa 4: Peletizadora de anillo de agua	Alternativa 5: Extrusora de dado plano	Alternativa 1: Compactadora vertical	Alternativa 2: Trituradora	Alternativa 3: Peletizadora de filamentos	Alternativa 4: Peletizadora de anillo de agua	Alternativa 5: Extrusora de dado plano
Inversión e infraestructura requerida	0,20	0,39	0,29	0,17	0,09	0,06	0,08	0,06	0,04	0,02	0,01
Residuos y/o emisiones generados	0,14	0,41	0,31	0,09	0,12	0,07	0,06	0,04	0,01	0,02	0,01
Idoneidad técnica y tecnológica	0,11	0,36	0,33	0,17	0,08	0,06	0,04	0,04	0,02	0,01	0,01
Salud y seguridad en el trabajo	0,11	0,43	0,32	0,08	0,11	0,06	0,05	0,04	0,01	0,01	0,01
Mano de obra requerida	0,10	0,41	0,31	0,06	0,13	0,09	0,04	0,03	0,01	0,01	0,01
Consumo de recursos	0,10	0,38	0,34	0,13	0,09	0,06	0,04	0,04	0,01	0,01	0,01
Beneficios sociales	0,10	0,06	0,14	0,20	0,26	0,34	0,01	0,01	0,02	0,03	0,03
Eficiencia y cantidad de productos generados	0,09	0,05	0,12	0,19	0,32	0,32	0,01	0,01	0,02	0,03	0,03
Ciclos cerrados	0,04	0,05	0,09	0,21	0,33	0,33	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
TOTAL							**0,316**	**0,271**	**0,140**	**0,146**	**0,127**

Fuente: Elaboración propia.

Tal y como se puede apreciar, la alternativa con mayor calificación y la más viable de implementar fue la compactadora vertical, con un puntaje total de 0,316, y en segundo lugar se tiene la trituradora con 0,271. Esto debido a que el criterio de mayor peso en la decisión corresponde a la inversión e infraestructura requerida, por lo que los costos de la maquinaria de cada una de las tecnologías influyeron de manera significativa en la decisión final. La compactación es una tecnología común en el manejo de los residuos y en comparación a las otras cuatro alternativas evaluadas es la más económica.

Si bien el propósito del análisis multicriterio era evaluar tecnologías para la valorización y el tratamiento del PET, se incluyó la tecnología de compactación dentro del análisis pese a que implica una transformación de la forma de material y no supone un valor agregado a los residuos tratados, porque la compactación evita inconvenientes se pueden presentar en la etapa de acondicionamiento y disposición previa al tratamiento del material. Dentro de los procesos del reciclaje en Bogotá la compactación de materiales como el PET facilitan las tareas de los recicladores y agiliza el transporte y el almacenamiento, en sitios como los centros de acopio, disminuyendo el volumen de la carga de PET y permitiendo un mayor uso del espacio locativo (Cardona Rojas & Pérez Beltran, 2021).

La compactación es de las tecnologías más económicas y accesibles, en el mercado, el precio promedio de una máquina compactadora es de alrededor de $ 21.100.000 (cerca de 4.400 USD) (Cardona Rojas & Pérez Beltran, 2021), pero en el mercado se pueden encontrar compactadoras desde valores de $4.000.000 (aprox. 830 USD). La compactación es importante particularmente en la actividad y logística de bodegas y lugares de almacenamiento, como los centros de acopio, donde se pueden recibir y acumular una mayor cantidad de residuos al reducir su volumen, así mismo, se facilitan el pesado del material y su comercialización a plantas procesadoras (Cardona Rojas & Pérez Beltran, 2021)

La segunda tecnología con mayor calificación, que se puede apreciar en la matriz de calificación es la trituración. Este proceso es importante porque reduce el volumen de los residuos plásticos mucho más que la compactación, al transformarlos en pequeños trozos, lo que no solo facilita su manejo, almacenamiento y transporte, sino que también genera un valor agregado, ya que el plástico triturado tiene un precio mayor que los residuos sin tratar. Y no solo eso, la trituración es un proceso fundamental en el reciclaje mecánico, porque antecede otras etapas de valorización del plástico como el lavado, secado, y moldeado, incluso se facilitan procesos de clasificación.

Por lo anterior, la trituración se convierte en el principal mecanismo para reducir y aprovechar los residuos de plástico PET, además de que el material triturado puede ser comercializado con empresas que lo usen como materia prima en la manufactura de sus productos, representando beneficios económicos (Clevel Angulo, 2020). En procesos como el peletizado y la extrusión requieren de una previa trituración del material antes de ser ingresado a las máquinas para su transformación. Sin embargo, para que el triturado sea de calidad y valor para su comercialización, lo ideal es que este se encuentre limpio, lo que puede implicar el uso de tecnologías de cribado, limpieza en seco o de lavado.

Tal y como se aprecia en la matriz, las tecnologías más complejas como el peletizado y la extrusión obtuvieron una calificación baja, principalmente porque, pese a que generan productos de mejor calidad, son mucho más costosas y menos accesibles a la población recicladora de oficio. Además, este tipo de tecnologías tienen varios requerimientos y suelen ser de grandes dimensiones, por lo que para su buena implementación es conveniente una buena planificación.

De acuerdo con Markarian (2004), al momento de elegir una de estas tecnologías para moldear el plástico, como el peletizado se recomienda primero definir los requisitos del proceso, como: las características del material entrante (tipo de polímero, densidad, viscosidad, nivel de absorción de agua, temperatura de fusión), forma de enfriamiento, rendimiento deseado, el nivel deseado de automatización, tamaño del lote a procesar, cantidad de espacio disponible, costo del equipo, fiabilidad y desgaste anticipado de piezas; y para el caso de la peletización, establecer la forma y dimensiones de los gránulos, los niveles permisibles de polvo y finos.

El plástico, y en particular el PET, es un material de amplia distribución y utilización, por lo que tiene varias posibilidades viables de implementarse en procesos de transformación. De acuerdo con la UAESP (2021), "económicamente las oportunidades para el aprovechamiento y transformación de residuos plásticos son directamente proporcionales a su generación". El plástico PET tiene un gran potencial de aprovechamiento, pero dentro de las principales problemáticas que hacen que su recuperación y valorización sea ineficiente se encuentra la suciedad presente en los materiales que obstaculiza su correcta transformación, dificulta su almacenamiento y transporte, puede generar olores y atraer vectores (Cámara de Comercio de Bogotá, 2021), lo que entorpece la cadena del reciclaje. Por lo que antes de pasar a una transformación, se puede considerar también la implementación de tecnologías que mejoren los procesos de clasificación y limpieza, garantizando el mantenimiento de los materiales dentro de la cadena del reciclaje. Así mismo, también hay que tener en cuenta la posibilidad de conseguir las diferentes tecnologías de segunda mano o remanufacturadas, puesto que dentro de la economía circular los principios también a las maquinarias y equipos, y no solo a los materiales

Los procesos de transformación del plástico PET, se encuentran en la economía circular dentro del modelo de valoración de residuos, que plantea que los materiales que se descartan después de su uso pueden utilizarse como materia prima para la fabricación de otros productos. Este modelo incluye diversas prácticas como la separación en la fuente, sistemas de recolección, limpieza y procesamiento de materiales reciclados, promover tecnologías para el reciclaje, aprovechamiento y tratamiento de recursos, e incentivar su comercialización (Bueno Arias, Cabezas Porras, Martínez Valencia, & Ospina Alba, 2021).

La comercialización de residuos aprovechables se está estableciendo en el mercado como un negocio rentable, en parte porque estos se generan de manera constante y en grandes cantidades en Bogotá. Para el caso de los residuos de PET, en la ciudad se necesita de un sistema organizado para un mayor aprovechamiento de estos, donde se impulsen procesos de tratamiento y transformación, como los abordados anteriormente, para darles un valor agregado. Esto con la finalidad de que se facilite su valorización y su reinserción como materia prima dentro de la industria, porque actualmente la comercialización del PET recuperado se basa en la acumulación de cantidades de material con poco o sin valor agregado para satisfacer la demanda, y las empresas transformadoras del plástico deben dedicarse también a los procesos de acondicionamiento (Benavides Marroquín, 2021).

Como ya se ha mencionado anteriormente, el manejo de los residuos plásticos en el país, dentro de la Estrategia Nacional de Economía Circular se aborda desde el flujo de materiales de envases y empaques, que cuenta cuentan con cuatro indicadores de avance que son: 1) aprovechamiento de los residuos de envases y empaques, 2) gestión ambiental adecuada de los mismos, 3) número de recicladores en proceso de formalización sobre formalizados y 4) aprovechamiento de dichos residuos articulado al principio de la responsabilidad extendida al productor (Bueno Arias, Cabezas Porras, Martínez Valencia, & Ospina Alba, 2021). Desde donde se reconoce la labor del reciclador como parte importante en la implementación del modelo de la economía circular en el país como camino hacia la sostenibilidad, valorando los conocimientos y experiencias de esta población que ha aportado desde hace varios años a la gestión de residuos.

De acuerdo con Tovar (2018), "los recicladores sobre los materiales, las dinámicas del mercado y el comportamiento de los precios. Saben cuáles mercancías deberían rediseñarse en la cadena de producción". Por consiguiente, debería existir un diálogo entre la industria, las instituciones y los recicladores, orientado hacia la economía circular, y que de igual manera, los usuarios y consumidores aprendan de los recicladores sobre cómo separar en la fuente y entregar el material, buscando establecer

relaciones sinérgicas y no unidireccionales, donde se consideren a los recicladores como el eje central de la actividad de aprovechamiento (Tovar, 2018), ello entonces que se debe trabajar en promover la implementación de tecnologías y procesos que aporten a la labor del reciclador de oficio y a la dignificación y formalización de su trabajo.

En cuanto al desarrollo del análisis multicriterio, para el caso de la metodología AHP, el proceso de decisión está sujeto a la subjetividad de la persona que lo realiza. Por ello, para la definición de los criterios y la asignación de los pesos, lo ideal es contar con opiniones o juicios de valor emitidos por expertos en el tema. De igual forma, en la calificación de alternativas se puede contar con un panel de jueces que pueden tomar las decisiones ya sea acordando entre ellos, lo que implica interdependencia y concertación, o proporcionando sus valoraciones de forma independiente sin discusión entre ellos (Bernal Romero, 2018). Sin embargo, para el presente estudio, por cuestiones de tiempo no fue posible realizarlo de esta manera, por lo que los juicios emitidos en las matrices presentadas anteriormente se sustentan en información secundaria revisada.

8.3 Planteamiento de la hoja de ruta para la implementación de un proyecto piloto de una de las tecnologías priorizadas

Como se ha descrito anteriormente, el proceso más simple y de menores requerimientos para el tratamiento o transformación del plástico es la molienda o trituración. La trituración del PET además de reducir el tamaño de los residuos y facilitar su manejo, es esencial en la cadena de reciclaje mecánico del plástico, puesto que antecede otros procesos como el moldeo, donde se otorga al plástico una nueva forma y un nuevo uso.

Teniendo en cuenta lo anterior, a continuación, se presenta una hoja de ruta para la implementación del reciclaje mecánico (pretratamiento de residuos de PET) donde el proceso principal es la trituración del material, y el producto final son las escamas de PET.

8.3.1 Información general de la hoja de ruta

Tabla 38. *Información general de la hoja de ruta para la implementación de una máquina trituradora.*

Información de la hoja de ruta	
Nombre de la hoja de ruta	Pretratamiento de residuos de plástico PET para su valorización dentro del marco de la economía circular
Objetivos de desarrollo sostenible (ODS) relacionados	Dentro del marco de la economía circular, y la contribución al reciclaje de oficio, se abordan principalmente los siguientes ODS: • ODS 8: trabajo decente y crecimiento económico • ODS 9: industria, innovación e infraestructura • ODS 12: consumo y producción sostenible • ODS 13: acción por el clima
Descripción	Se abordará la ruta del reciclaje mecánico del PET desde la recolección del material hasta la trituración. Se abordan los procesos de clasificación, preparación de los residuos, lavado, secado y molienda o trituración.

Objetivo de la implementación	Contribuir a que desde el reciclaje de oficio se dé el siguiente paso en la cadena de valorización del plástico, es decir la transformación. Buscando la obtención de un material triturado de mayor valor.
Área o proceso relacionado	Reciclaje mecánico de plásticos. Pretratamiento de plástico en centros de acopio o bodegas de organizaciones de recicladores.

Metodología de implementación	Antes de querer implementar el pretratamiento, lo primordial es validar el mercado: indagar si el producto triturado tiene o no salida y cuál es la demanda, si hay interés por parte de las empresas en comprar este material.
	A partir del estudio de Clevel Angulo (2020), *Diseño de una trituradora de PET como herramienta de apoyo para las asignaturas de ingeniería de Unicatólica*, se plantea que para la implementación del proceso de triturado de PET se realizar las siguientes actividades:
	• Establecer los requerimientos de lugar:
	  ○ Elegir el lugar donde será instalada la trituradora.
	  ○ Identificar la distribución de equipos y actividades que se realizan en dicho lugar.
	  ○ Medir disponibilidad de espacio, energía y ventilación de dicho lugar.
	• Determinar la maquinaria
	  ○ Decidir si se adquiere una trituradora en el mercado o se diseña una de acuerdo con unos requerimientos específicos
	  ○ Si se diseña: Elaborar el diseño de máquina, contactar a una empresa para su fabricación.
	  ○ Si se compra: evaluar diversas alternativas y modelos a elegir, comparar las características y elegir el más acorde.
	• Análisis de costos.
	  ○ Identificar los costos de inversión y el presupuesto para la adquisición de la máquina. Estudiar las posibles ganancias económicas de la implementación del proceso.
	  ○ Mediante estudios financieros determinar la viabilidad y el mercado del PET molido.
	• Instalar y posicionar la máquina en el lugar más acorde. Capacitar al personal para el manejo de la maquinaria, señalizar el lugar y contar con EPP. Planes de SST.

Características y requerimientos de implementación	Para la realización del pretratamiento de PET se debe tener en cuenta: • Identificar los flujos de material en el sitio donde se implementaría del proceso, es decir, cuánto material se maneja. • Evaluar la adquisición de tecnologías según la capacidad económica, es decir, identificar qué maquinarias para la limpieza y el triturado. Se puede optar por adquirir los equipos por separado (un equipo para cada proceso), o adquirir un equipo adaptado para realizar el lavado, secado y molido en secuencia. En el mercado se pueden adquirir estos equipos ya hechos, o existen empresas que los diseñan y los fabrican según las necesidades específicas del comprador. • Tener en cuenta las características de las máquinas, especialmente la del molino triturado, que es el proceso principal, como la capacidad de romper el plástico, la

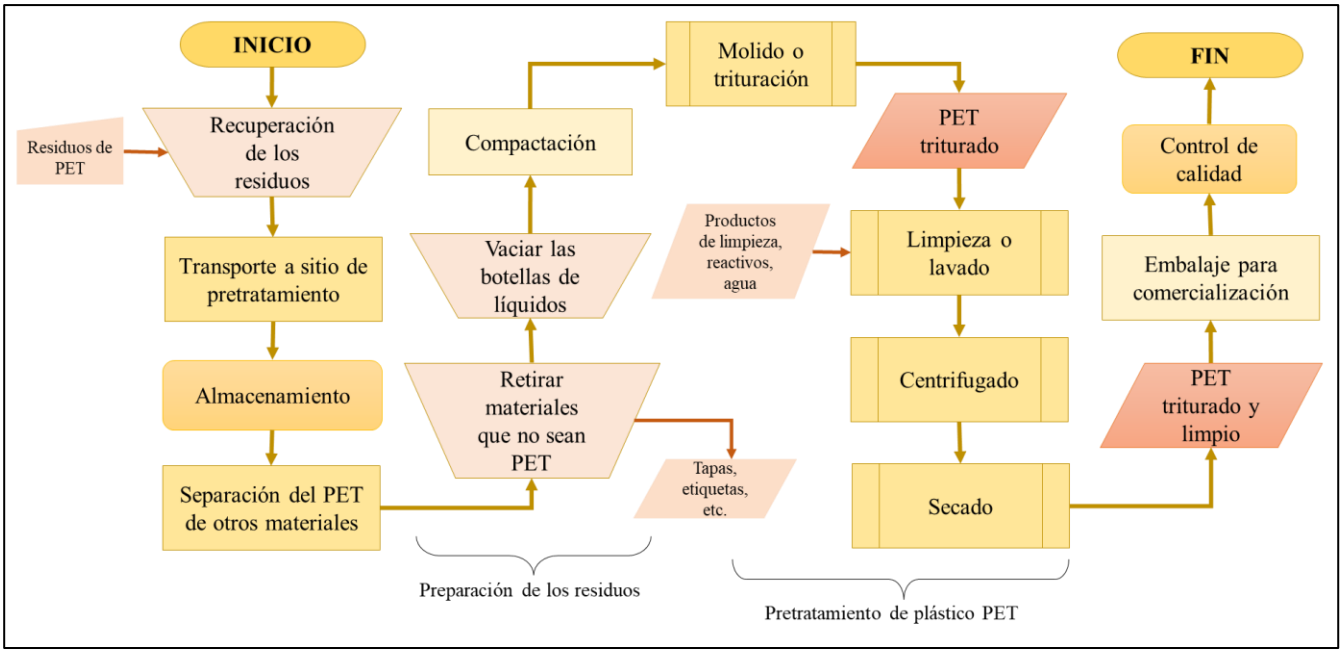
	obtención de trozos de tamaño adecuado, dimensiones, seguridad, eficiencia de la máquina (Benavides Marroquín, 2021), entre otras. • El plástico PET se separa por colores para su tratamiento.
Variables de operación	Residuos de plástico PET

Fuente: Elaboración propia.

Con base en el estudio de Benavides Marroquín (2021), *Plan de negocios para el aprovechamiento y comercialización de los residuos derivados del Politereftalato de etileno (PET) en la ciudad de Bogotá*, se debe plantear el proyecto de implementación, que cuente con: perfil del proyecto, estudio de mercado, estudio técnico, estudio organizacional, estudio de impacto social, estudio de impacto ambiental, evaluación financiera, consideraciones cualitativas, análisis de riesgo y sensibilidad. Todo ello, orientado hacia los objetivos, las necesidades y posibilidades económicas y logísticas de la organización o el sitio donde se desee ejecutar la propuesta.

El proceso de pretratamiento del plástico PET hasta su trituración abarca diversas actividades, que inician desde la recuperación del material en la fuente de generación. Luego, este es transportado al lugar predispuesto para el pretratamiento, donde se hace una separación del material, se puede compactar para facilitar su transporte y manejo, y se prepara para el proceso. Para ello, lo primero es vaciar completamente de los residuos, particularmente las botellas, de líquido, y después se retiran los materiales que no sean de PET, como tapas, anillos y etiquetas; esto contribuye a optimizar tiempos y garantiza que el plástico no se mezcle con otro tipo de materiales que puedan dificultar su transformación (Benavides Marroquín, 2021) o afectar la calidad del producto final. Posteriormente se pasa por las diversas máquinas: molido o trituración, limpieza, centrifugado y secado; para obtener el PET en pequeños trozos uniformes que finalmente pueden ser embalados y comercializados para ser moldeados y formar nuevos productos.

Figura 44. *Diagrama de flujo de procesos del pretratamiento de residuos de plástico PET.*



Fuente: Elaboración propia.

Los procesos de lavado y secado se pueden realizar antes de triturado, pero generalmente se realizan después, puesto que el PET ya triturado tiene una mayor facilidad y mejor eficiencia a la hora del lavado, puesto que cuenta con mayor superficie de contacto con el agua que una botella (Paz, 2016).

Según Clevel Angulo (2020), el funcionamiento de las máquinas trituradoras se divide en tres partes fundamentales: la primera es la tolva o la boca, donde se introducen los residuos plásticos y evita que salgan de la máquina cuando esté en funcionamiento. En segundo lugar, se encuentra el rotor, que está conectado al motor, e incorpora las cuchillas que rompen el plástico. Una adecuada trituración depende del filo, la potencia y la velocidad de giro de esta parte. En último lugar se tiene un tamiz o rejilla, que filtra los trozos de PET hacia el exterior, el tamaño de estos trozos depende del de los orificios del tamiz, porque el plástico se mantiene en la zona de corte hasta obtener el tamaño adecuado para atravesarlo.

8.3.2 Cronograma general de aplicación

Teniendo en cuenta lo planteado en la hoja de ruta, a continuación, se presenta de manera general las principales actividades a desarrollar para la implementación de un proceso de pretratamiento en un periodo no mayor a tres meses:

Tabla 39. *Cronograma estimado para la implementación de la tecnología de trituración.*

Actividad	Mes 1				Mes 2				Mes 3			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Establecer los requerimientos del lugar donde se realizará el pretratamiento. Disponibilidad de espacio, electricidad, etc.												
Definir el lugar para la instalación de la maquinaria												
Caracterizar el flujo de materiales: Cuánto PET se maneja y cuánto se va a tratar.												
Precisar las características de la maquinaria que se requieren, de acuerdo con las necesidades de reciclaje.												
Decidir la adquisición de la maquinaria: comprar o diseñar y encargar. Cotizar, evaluar y definir												
Adquisición de la maquinaria												
Instalación, adecuación y señalización												
Capacitación al personal												

Fuente: Elaboración propia.

8.3.3 Recursos necesarios y requerimientos adicionales

En la siguiente tabla se presentan algunos de los recursos que se consideran necesarios para el proceso de pretratamiento de PET:

Tabla 40. *Principales recursos requeridos para la trituración.*

Recursos	
Económicos	Inversión inicial para adquisición de maquinaria. Teniendo como referencia el estudio de Benavides Marroquín (2021), el costo de la maquinaria (molino, centrífuga y secador) se encuentra en alrededor de $18.000.000 (unos 3.700 USD).

	Presupuesto para pago de servicios públicos como agua y electricidad, que son requeridos en el proceso.
	Pago a mano de obra externa de ser requerida, como técnicos para mantenimiento.
Tecnológicos	Máquinas como triturador, maquinaria para lavado y secado.
	Repuestos para mantenimiento
Humanos	Operarios: personal capacitado para el control de la maquinaria
	Técnicos para asegurar el buen funcionamiento
Otros	Insumos como detergentes u otras sustancias para la fase de lavado. Elementos de protección personal y señalización.

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la máquina trituradora, que realiza la etapa principal del pretratamiento, de acuerdo con Cuaical, Barreiro, Salazar & Gutiérrez (2020), se deben considerar diversos requerimientos y parámetros para su adecuado funcionamiento, dentro de los que se encuentran:

Tabla 41. *Requerimientos y parámetros para una trituradora de plástico PET.*

Parámetro / requerimiento	Descripción
Capacidad de trabajo de la máquina	El rango de capacidad de trabajo por día, es decir, el flujo másico de plástico PET que la máquina procesará en un día
Calidad del producto triturado	Se refiere al tamaño del grano deseado
Selección de materiales	La máquina debe contar con materiales no corrosivos que puedan afectar la calidad del producto,
Dimensionamiento	El rango de botellas que podrán ser introducidas en la máquina, y cuánto espacio ocupa esta.
Costo de la máquina	Relación costo-eficiencia. Procurar una eficiencia alta a un costo más bajo.
Consumo energético	El motor debe tener el menor consumo energético posible.
Mantenimiento y seguridad	Diseño sencillo y seguro
Sistema de enfriamiento	De ser posible, que cuente con un sistema de enfriamiento para el sobrecalentamiento de las cuchillas, evitando su desgaste.
Acumulación del material	En donde se va a almacenar el material una vez salga del triturado por la tolva de salida, evitando también atascamientos.
Ruido emitido	Optar por equipos más silenciosos para evitar la contaminación sónica, garantizando el bienestar de los operarios.
Velocidad de los sistemas de la máquina	Las velocidades críticas de los ejes no pueden ser mayores a las del motor. En parte, esto determinará la eficiencia del proceso.
Anclaje	La estructura soporte se debe anclar correctamente al suelo, por seguridad. Puesto que las máquinas trituradoras suelen encontrarse en constante vibración.

Fuente: Cuaical, Barreiro, Salazar, & Gutiérrez, 2020.

8.3.4 Beneficios esperados

Dentro del concepto de ambiente y sus dimensiones, se establecieron los principales beneficios que traería la implementación del proceso de pretratamiento de PET hasta la trituración, al reciclaje de oficio principalmente de la localidad de Suba en Bogotá:

- *Beneficios sociales*

En este aspecto, se espera contribuir a la labor del reciclaje de oficio en la ciudad, facilitando sus procesos y mejorando sus condiciones de trabajo. Todo ello encaminado dentro de ideales como el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible, la dignificación del reciclador de oficio como servidor público dentro del servicio de aseo y la actividad de aprovechamiento, y el reconocimiento del trabajo de estas personas en la mitigación de problemas ambientales como el cambio climático. Así mismo, se fomenta el reciclaje como un pilar importante dentro del modelo de economía circular como camino hacia la sostenibilidad. Los beneficios sociales también se pueden reflejar en el bienestar y la salud de las personas, la mejora de la calidad de vida de la población recicladora, y su oficio.

- *Beneficios económicos*

Se busca obtener mayores ganancias de la comercialización del PET triturado, que superen las obtenidas del PET sin procesar. De acuerdo con Caviedes Aguirre (2020) el precio del PET triturado se encuentra en alrededor de $3.000, mientras que para Benavides Marroquín (2021), este se encuentra entre $2.400 y $2.700 por Kg, lo que supera el precio del PET sin tratar que se encuentra entre $600 y $2.000 pesos el kg. Es importante resaltar que el PET cristal o transparente es el que mejor se comercializa y el que mayor precio tiene en el mercado, mientras que los de colores más oscuros son menos comercializados y tienen un bajo precio.

Para identificar con precisión los beneficios económicos del proceso y la viabilidad financiera del mismo a largo plazo, es necesario un estudio económico, donde se identifiquen variables como las inversiones, depreciaciones, ingresos, egresos, logística, impuestos, entre otros, que sean acordes a las características de un sitio específico de implementación.

- *Beneficios ambientales*

Se contribuye a la gestión y aprovechamiento de los residuos plásticos, dentro de la economía circular. El proceso de pretratamiento de los residuos de plástico PET, implica que desde el reciclaje de oficio se dé un paso más en la cadena del reciclaje de plásticos, lo que aporta a una mayor valorización de este material y su reintroducción al ciclo productivo. Se disminuye la contaminación y la afectación a los ecosistemas causados por este tipo de residuos. Por otro lado, también se contribuye a aumentar la vida útil del relleno sanitario, evitando que materiales como el PET lleguen a este sitio, y a reducir la demanda de materiales vírgenes, lo que aporta a la preservación de los recursos y la reducción del uso de energía.

Para la ejecución de proyectos orientados a la implementación de estas tecnologías, y que involucra a la población recicladora, existen alternativas de financiación, como programas de incentivos otorgados por diversas entidades. Un ejemplo es la iniciativa “Reciclar tiene valor Bogotá - RTVB”, que tiene como objetivo consolidar el aprovechamiento de los materiales posconsumo en Bogotá y municipios aledaños, y que cuenta con la participación de empresas como Nestlé, Postobón Coca-Cola Bavaria y Tetra Pak (Asociación Colombiana de Ingenieros de Sistemas - ACIS, 2022).

Este proyecto ha ejecutado acciones desde el 2021, es operado por CEMPRE Colombia, y cuenta con inversiones para: mejorar la infraestructura de las estaciones de clasificación y aprovechamiento (ECAs), adquirir maquinaria para el manejo de residuos, y procesos de capacitación y sensibilización (ASIS, 2022).

Otro ejemplo es el Programa de Incentivos de la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos - UAESP, creado por la Resolución 233 de 2022 de dicha institución, y con la que se "busca fortalecer las iniciativas, proyectos y procesos desarrollados por las organizaciones de recicladores, como reconocimiento a su labor social y empresarial en la ciudad" (UAESP & Olaya, 2022). Para ello, se realiza convocatoria pública (*Figura 45*), y un concurso para el otorgamiento de recursos.

Figura 45. *Pieza publicitaria de una convocatoria para que las organizaciones de recicladores de Bogotá puedan acceder al Programa de Incentivos de la UAESP*

Fuente: UAESP, 2022.

Las organizaciones participantes deben cumplir con tres criterios: estar activas en el Registro Único de Organizaciones de Recicladores de Oficio (RUOR) de la UAESP, contar con el Registro Único de Prestadores del Servicio Público (RUPS) de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, y estar vigente (UAESP & Olaya, 2022). Es necesario conocer más sobre estas iniciativas de financiación, para que la población recicladora pueda implementar tecnologías más modernas, complejas y eficientes que contribuyan a su labor.

9. Conclusiones

Con el fin de conocer de manera general el panorama global investigativo sobre el reciclaje de tereftalato de polietileno o PET, se realizó un análisis bibliométrico donde se analizaron 1.040 artículos científicos de la base de datos Scopus. Se encontró que la producción científica anual tiene una tasa de crecimiento del 23,18%, lo que indica que cada vez se producen más artículos relacionados al tema. Los

países que más investigaciones generan son China, Estados Unidos, Brasil, Irán y Alemania, y en comparación con estos países, Colombia produce pocas investigaciones sobre el reciclaje de tereftalato de polietileno según los criterios del análisis. Las innovaciones tecnológicas sobre el tema tienen un alto grado de desarrollo, pero aún no son de gran relevancia dentro del campo investigativo, pero el análisis de ciclo de vida se posiciona como un tema emergente. Las revistas *Waste Management* y *Journal of Cleaner Production* son las que más artículos producen al respecto y las de mayor impacto, de acuerdo con el índice H. A nivel científico, existen diversas investigaciones en las que se explora la biodegradación del plástico.

Si bien existen diversos tipos de tecnologías para la transformación del PET, muchas de estas aún están emergiendo y se están estudiando de manera exploratoria, como es el caso del reciclaje químico, que poco a poco ha empezado a consolidarse, pero aún no se emplea de manera sistematizada. En este sentido, la presente monografía se enfocó en los procesos de reciclaje mecánico, los cuales se encuentran mucho más afianzados en el mercado y por ende son más accesibles a la población objetivo.

El PET es un material con gran potencial de aprovechamiento, principalmente por su carácter de termoplástico, es decir, que en altas temperaturas se ablanda y se vuelve flexible, llegando a fluir y cuando baja la temperatura, vuelve a ser sólido y rígido. Esta propiedad hace que el PET pueda ser moldeado varias veces, favoreciendo su reciclabilidad de forma mecánica. El reciclaje mecánico implica procesos físicos para el tratamiento de los residuos dentro de los que se encuentran la clasificación, el lavado y secado, la trituración o molienda, y el moldeo.

A partir de ello, mediante un análisis multicriterio basado en la metodología de análisis jerárquico o AHP, se hizo una priorización de cinco tecnologías de reciclaje mecánico que fuesen más acordes al contexto del reciclaje de oficio de la localidad de Suba en Bogotá. Las tecnologías evaluadas fueron: compactadora vertical , trituradora, peletizadora de filamentos, peletizadora de anillo de agua y extrusora de dado plano. La priorización se realizó teniendo en cuenta nueve criterios dentro de las dimensiones económica, ecológica y social. Como resultado se obtuvo que la compactación, pese a que no implica una transformación ni un valor agregado a los residuos de PET, es la tecnología más económica, accesible, de fácil implementación y más viable de implementar por recicladores de oficio, además de que facilita los procesos de almacenamiento y transporte.

En análisis multicriterio el criterio de mayor peso para la priorización de las tecnologías fue la inversión e infraestructura requerida, ya que este es un determinante para la adquisición e implementación de dichas tecnologías.

Sin embargo, se consideró que la tecnología más idónea para agregar valor a los residuos de PET es la trituración que se puede ver reflejado en el precio de comercialización, además de que este es un proceso fundamental para el reciclaje mecánico del plástico. Por consiguiente, se planteó una hoja de ruta orientada a la implementación de un proceso de pretratamiento de residuos PET, donde el producto final es el plástico triturado.

Se resaltó el reciclaje de oficio como un pilar fundamental en la gestión de los residuos y en el desarrollo e implementación del modelo de economía circular como ruta hacia la sostenibilidad en la ciudad. Desde la ingeniería ambiental se debe trabajar en el mejoramiento de la calidad de vida de las poblaciones y el mantenimiento de los ecosistemas, por lo que abordar los temas de reciclaje y trabajar en el mejoramiento de sus procesos, contribuye a promover el desarrollo sostenible.

La metodología empleada permitió cumplir con los objetivos previstos, así mismo, esta puede ser replicable e implementada en estudios de carácter similar, donde se exploren las tecnologías de valorización de otro tipo de materiales, involucrando también procesos de vigilancia tecnológica.

10. Recomendaciones

Para conocer de manera más precisa el estado de la investigación en cuanto al reciclaje de PET, se recomienda realizar un estudio dedicado especialmente al análisis cuantitativo de la producción científica y académica en Colombia y en los países líderes en investigación, donde se pueda implementar un análisis bibliométrico mucho más estructurado, con mayor solidez y detalle. En este sentido, se sugiere considerar más variables, implementar varias bases de datos, emplear ecuaciones más diversas y analizar muchas más métricas, para tener un panorama más amplio del campo, y poder realizar una comparación entre los avances científicos en el país y otros países.

Se pueden considerar otro tipo de tecnologías que no solo se enfoquen en la transformación sino también en procesos como la limpieza o la separación, que de igual forma son necesarios para el reciclaje del PET.

Se sugiere la aplicación de instrumentos como encuestas y entrevistas a diversos actores de la cadena de reciclaje del plástico, para obtener información de primera mano que sea más cercana al contexto trabajado. También se pueden realizar visitas técnicas para mapear iniciativas de aprovechamiento y documentar casos de éxito de esta población al frente de montajes para la transformación de materiales.

En cuanto al análisis multicriterio, es recomendable que este se realice de la mano de expertos en el tema y que la calificación de alternativas se haga con varios jueces para reducir sesgos y subjetividad. Al momento de priorizar las tecnologías es necesario contar con información más puntual y precisa, en este aspecto se pueden evaluar modelos específicos de maquinarias y realizar cotizaciones.

Para identificar las tecnologías más acordes al contexto de estudio y plantear la hoja de ruta, es fundamental contar con un diagnóstico claro del sitio de implementación, así mismo, es crucial la realización de diversos estudios de viabilidad, especialmente a nivel económico y financiero, con el fin de conocer de manera más exacta las implicaciones en términos de costos e infraestructura.

Antes de llegar a la implementación de estas tecnologías, es necesario estructurar el modelo de negocio del producto a obtener y validar que este tenga demanda. También se recomienda estudiar las implicaciones de la prohibición de plástico de un solo uso a la hora de pensar en inversiones para el aprovechamiento de estos materiales.

Se pueden explorar alianzas con privados o públicos para que apoyen y trabajen con las asociaciones de recicladores de oficio en el montaje y operación de estos proyectos.

Finalmente se recomienda ahondar en las opciones de financiación con las que se pueden apoyar los recicladores para implementar tecnologías y modernizar sus sitios de trabajo. Por ejemplo, promover que estas personas apliquen a los proyectos que definen el incentivo de aprovechamiento IAT, o que trabajen en los proyectos TIPO del DNP para buscar recursos.

11. Referencias bibliográficas

Abaunza Barón, L. P., Castellanos Cuadrado, C. M., & Malagón Rodríguez, G. M. (2019). *Informe Técnico- Proyecto: Perfilar 200 empresas transformadoras de Plástico posconsumo en Bogotá.* Informa técnico, Acoplásticos & Universidad Piloto de Colombia, Bogotá. Obtenido de https://www.plas-tic.org/files/informes/informe_transformadores_de_plastico_bogota_0.pdf

Acoplásticos. (s.f.). *¿Qué es el PET?* Obtenido de Acoplásticos: https://www.acoplasticos.org/index.php/mnu-pre/opm-bus-pref/36-opc-fag-pre4

Acoplásticos. (25 de Noviembre de 2019). *200 Empresas de Bogotá reciclan y transforman cerca de 110 mil toneladas de plástico posconsumo al año*. Obtenido de Acoplásticos: https://www.acoplasticos.org/index.php/mnu-noti/330-ns-191125

Acoplásticos. (2022). *Encuesta de Precios del Mercado de Reciclaje en Colombia: Agosto 2022.* PLAS-TIC. Obtenido de https://www.plas-tic.org/files/encuesta_2022agosto_precios_de_reciclaje.pdf

Acoplásticos. (2022). *Quienes Somos*. Obtenido de Acoplásticos sitio web: https://www.acoplasticos.org/index.php/mnu-nos/mnu-nos-nta-aso

Aguilar Barros, G. A., & Aguilar Barros, G. D. (2022). *Estudio de prefactibilidad para la fabricación y comercialización de escritorios ecológicos fácil de ensamblar elaborados con madera plástica.* Universidad de Lima, Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Lima: Universidad de Lima. Obtenido de https://repositorio.ulima.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12724/15797/Aguilar-Aguilar_Estudio-prefactibilidad-fabricacion.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Alcaldía Mayor de Bogotá & UAESP. (2022). *El reciclador de oficio en Bogotá: un trabajo que dignifica a la ciudad* (Segunda ed.). Bogotá: Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos – UAESP. Obtenido de https://www.uaesp.gov.co/sites/default/files/micrositios/aprovechamiento/el_reciclador_de_oficio/El_Reciclador_de_Oficio_en_Bogota_2_edicion_2022.pdf

Alcaldía Mayor de Bogotá. (2022). *Localidad de Suba*. Obtenido de Alcaldía de Bogotá: https://bogota.gov.co/mi-ciudad/localidades/suba

Amaya Giraldo, A. I., & Lamilla Cabrera, A. M. (2018). *Planta de transformación de plástico recuperado PET, PEAD y PEBD, en la ciudad de Bogotá D.C.* Proyecto de Especialización en Gestión de Proyectos de Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá. Obtenido de https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/13576/LamillaCabreraAnaMaria2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y

ANDI. (2022). *Quiénes somos*. Obtenido de ANDI - Asociación Nacional de Empresarios de Colombi: https://www.andi.com.co/Home/Pagina/1-quienes-somos

Angulo Martínez, L. M. (2022). *El reciclado del polietileno de tereftalato y su aporte a la economía circular*. Montería. Recuperado de https://repositorio.unicordoba.edu.co/bitstream/handle/ucordoba/5085/ANGULOMARTINEZLA

URAMARCELA.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Araújo Ruiz, J. A., & Arencibia Jorge, R. (2002). Informetría, bibliometría y cienciometría: aspectos teórico-prácticos. *ACIMED*, *10*, 5–6.

Aria, M., & Cuccurullo, C. (29 de marzo de 2022). *Science Mapping Analysis with bibliometrix R-package: an example*. Obtenido de Bibliometrix Web Site: https://bibliometrix.org/documents/bibliometrix_Report.html#section-5-thematic-map

Aria, M., & Cuccurullo, C. (s.f.). *Biblioshiny: bibliometrix for no coders*. Obtenido de Bibliometrix: https://bibliometrix.org/biblioshiny/assets/player/KeynoteDHTMLPlayer.html

Aristizábal Alzate, C. E., González Manosalva, J. L., & Gutiérrez Cano, J. C. (2020). Análisis del ciclo de vida y cálculo de la huella de Carbono para un proceso de reciclaje de botellas PET en Medellín (ANT). *Revista Producción + Limpia*, *15*(1), 7–24. https://doi.org/10.22507/pml.v15n1a1

Asociación Colombiana de Ingenieros de Sistemas - ACIS. (Junio de 2022). *Reciclar Tiene Valor Bogotá, incentiva a los recicladores de oficio para aumentar los índices de aprovechamiento en la capital*. Obtenido de Asociación Colombiana de Ingenieros de Sistemas - ACIS: https://acis.org.co/portal/content/reciclar-tiene-valor-bogot%C3%A1-incentiva-los-recicladores-de-oficio-para-aumentar-los-%C3%ADndices

Austin, H. P., Allen, M. D., Donohoe, B. S., Rorrer, N. A., Kearns, F. L., Silveira, R. L., … Beckham, G. T. (2018). Characterization and engineering of a plastic-degrading aromatic polyesterase. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *115*(19), E4350–E4357. https://doi.org/10.1073/pnas.1718804115

Ayora Sánchez, J. I., Zárate Carabajo, A. E., & Jimbo Días, J. S. (2020). La verdadera inclusión: controversia entre el reciclaje inclusivo y el reciclaje justo, en el marco del desarrollo sostenible. *Letras Verdes, Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*, 71–89.

Baño Martí, E. (4 de abril de 2019). *Qué son las máquinas trituradoras de plásticos y para qué sirven*. Obtenido de Interempresas.net: https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/405587-AIM3D-presenta-el-proceso-Voxelfill.html

Baño Martí, E. (17 de marzo de 2020). *Producción de pellets ¿Cómo realizarlo correctamente y detectar defectuosidades?* Obtenido de Interempresas.net: https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/266861-Produccion-de-pellets-Como-realizarlo-correctamente-y-detectar-defectuosidades.html

Baño Martí, E. (03 de marzo de 2021). *Molinos trituradores ¿cómo elegir el más adecuado?* Obtenido de Interempresas.net: https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/326462-Molinos-trituradores-como-elegir-el-mas-adecuado.html

Barin. (04 de mayo de 2021). *La aspiración de gases en la industria del plástico*. Obtenido de Actualidad Barin: https://www.barin.es/actualidad/2021/aspiracion-gases-industria-plastico/#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20gases%20emite%20la%20industria,y%20el%20di%C3%B3xido%20de%20carbono.

Beltrán Rico, M., & Marcilla Gomis, A. (2012). *Tecnología de polímeros. Procesado y propiedades* (Universidad de Alicante, ed.). Publicaciones de la Universidad de Alicante. Recuperado de https://books.google.co.ve/books?id=jxilUUn4_QAC

Benavides Marroquín, D. A. (2021). *Plan de negocios para el aprovechamiento y comercialización de los residuos derivados del Politereftalato de etileno (PET) en la ciudad de Bogotá.* Trabajo de grado para obtener título de ingeniero sanitario, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad del Medio ambiente y Recursos Naturales, Bogotá. Obtenido de https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/26152

Bernal Romero, S. (2018). *Modelo multicriterio aplicado a la toma de decisiones representables en diagramas de Ishikawa.* Trabajo de grado para obtener el título de: Ingeniero Industrial, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad de Ingeniería, Bogotá. Obtenido de https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/13894

Bibliometrix.org. (2022). *Bibliometrix*. Obtenido de Bibliometrix Web Site: https://www.bibliometrix.org/home/index.php/component/sppagebuilder/page/20

Bogotá Cómo Vamos. (s.f.). *Es la hora de reciclar*. Obtenido de Bogotá Cómo Vamos: https://bogotacomovamos.org/es-la-hora-de-reciclar/

Brooks, A. L., Wang, S., & Jambeck, J. R. (2022). The Chinese import ban and its impact on global plastic waste trade. *Science Advances*, *4*(6), eaat0131. https://doi.org/10.1126/sciadv.aat0131

Bueno Arias, L. C., Cabezas Porras, C. C., Martínez Valencia, A. F., & Ospina Alba, D. E. (2021). *Análisis del desarrollo de la economía circular aplicada al uso de envases para alimentos y bebidas en Colombia.* Universidad El Bosque. Bogotá: Universidad El Bosque. Obtenido de https://repositorio.unbosque.edu.co/handle/20.500.12495/6575

Bulgarelli-Bolaños, J., & Hernández-Salazar, I. (2020). Evolución de la producción científica sobre los conceptos HBIM y modelado 3D en la gestión de obras patrimoniales. *Tecnología en Marcha*. https://doi.org/10.18845/tm.v33i8.5512

Busch Systems. (2022). *What is waste?* Obtenido de Resource Center: https://www.buschsystems.com/resource-center/knowledgeBase/glossary/what-is-waste

Cámara Ambiental del Plástico. (2020). *Quienes somos*. Obtenido de Cámara Ambiental del Plástico: https://camaraambientaldelplastico.org/quienes-somos/

Cámara Argentina de la Industría Plástica. (2022). *Tipos de plásticos: ¿Qué sabemos sobre los materiales plásticos?* Obtenido de Cámara Argentina de la Industría Plástica: https://www.caip.org.ar/tipos-de-plasticos/

Cámara de Comercio de Bogotá. (2021). *Gestión empresarial de residuos: 1. Cadena de plástico.* Obtenido de Cámara de Comercio de Bogotá: Producción y comercio sostenible: https://www.ccb.org.co/produccionycomerciosostenible/Gestion-empresarial-de-residuos/1.-Cadena-de-plastico

Cardona Rojas, S. N., & Pérez Beltran, M. P. (2021). *Diseño de una máquina compactadora de botellas de tereftalato de polietileno (PET), destinada a servir como herramienta de apoyo a*

recuperadores. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Obtenido de https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/26270/Cardona%20Rojas%20Samira%20Nazly%20%20Perez%20Beltran%20Maria%20Paula%202021.pdf?sequence=1&isAllowe

Castañeda Ramírez, C. H., & Miranda Pérez, M. C. (2018). *Modelos más utilizados de reciclaje y reutilización de productos plásticos, y estrategias de recuperación más utilizadas en Colombia.* Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD . Bogotá. Obtenido de https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/18368/1112768881.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Castro Córdova, C. A. (2019). *Análisis y diseño de una planta de reciclaje de residuos sólidos inorgánicos en la ciudad de Moyobamba, 2018.* Moyobamba – Perú: Universidad Nacional De San Martín – Tarapoto. Obtenido de https://repositorio.unsm.edu.pe/bitstream/handle/11458/3953/ING.%20SANITARIA%20-%20Cleider%20Arturo%20Castro%20C%c3%b3rdova.pdf?sequence=1&isAllowed=

Caviedes Aguirre, J. D. (2020). *Diseño de una máquina trituradora para plástico pet.* Fundación Universidad de América, Facultad de ingenierías. Bogotá: Fundación Universidad de América. Obtenido de http://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/7904

CEMPRE. (2022). *Nuestra esencia*. Obtenido de CEMPRE: Compromiso empresarial para el reciclaje: https://cempre.org.co/nuestra-esencia/#seccionpropo

CIDEU. (2022). *Bogotá*. Obtenido de Blog de CIDEU: https://www.cideu.org/miembro/bogota/

Clevel Angulo, J. A. (2020). *Diseño de una trituradora de PET como herramienta de apoyo para las asignaturas de ingeniería de Uunicatólica.* Proyecto de investigación para optar al título de Ingeniero Industrial, Fundación Universitaria Católica Lumen Gentium, Facultad de ingenierías, Santiago de Cali. Obtenido de https://repository.unicatolica.edu.co/bitstream/handle/20.500.12237/1930/DISE%c3%91O_TRITURADORA_PET_COMO_HERRAMIENTA_APOYO.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Colnodo. (2018). *Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos*. Obtenido de Colnodo: https://www.colnodo.apc.org/es/organizaciones-aliadas/unidad-administrativa-especial-de-servicios-publicos

Colorplastic SAS. (11 de febrero de 2021). *¿Qué es el proceso de peletización del plástico?* Obtenido de Colorplastic SAS sitio web: https://colorplasticcolombia.com/2021/02/11/peletizacion-del-plastico/

Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. (2022). *Misión y visión*. Obtenido de Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR: https://www.car.gov.co/vercontenido/3

Cortés Mesa, A. Y., & Níelsen Avelta, M. S. (2019). *Aprovechamiento de aceite lubricante automotriz usado, como nueva línea de negocio en la empresa EMIR S.A E.S.P.* Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de: Ingeniero Ambiental, Universidad El Bosque, Facultad de Ingeniería, Bogotá. Obtenido de

https://repositorio.unbosque.edu.co/bitstream/handle/20.500.12495/2824/Cortes_Mesa_Adriann_Yusseth_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Correal, M. C., & Rihm, J. A. (2022). *Hacia la valorización de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. Conceptos básicos, análisis de viabilidad y recomendaciones de políticas públicas*. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18235/0003971

Cruz-Rojas, G. A., Molina-Blandón, M. A., & Valdiri-Vinasco, V. (2019). Vigilancia tecnológica para la innovación educativa en el uso de bases de datos y plataformas de gestión de aprendizaje en la universidad del Valle, Colombia. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, *9*, 303–317.

Cuaical, A., Barreiro, N. E., Salazar, A. M., & Gutiérrez, S. A. (2020). *Diseño conceptual de una máquina trituradora para botellas de PET*. Chía: Universidad de La Sabana. Obtenido de https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/64816957/diseno_conceptual_informe_1_-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1666974585&Signature=eTQRwv3JUwe671EGhQZeHuqxopoSOZCZIJPcBcfqvO2uRQfqJaouYcH8Xs7KfiPTOxZ0c4Ra29dcBJ2mkHNyjGEzJGzJKkeWkDzniTng4X33sl3ba-4DUbs8Zw9hqaD

Della Corte, V., Del Gaudio, G., Sepe, F., & Sciarelli, F. (2019). Sustainable Tourism in the Open Innovation Realm: A Bibliometric Analysis. *Sustainability*, *11*(21). doi:https://doi.org/10.3390/su11216114

Departamento Nacional de Planeación. (2022). *Misión, Visión y Origen*. Obtenido de Departamento Nacional de Planeación - DNP: https://www.dnp.gov.co/la-entidad/misi%C3%B3n-visi%C3%B3n-origen

Departamento Nacional de Planeación. (2016, 21 de noviembre). *Política Nacional Para la Gestión Integral de Residuos Sólidos* (Documento CONPES 3874). Bogotá D.C., Colombia: DNP.

Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., & Lim, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, *133*, 285–296. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070

Durán González, D. (2020). Guía de acciones para reducir la contaminación por plásticos de un solo uso en los municipios de Colombia. En *Fundación MarViva*. Fundación MarViva. Recuperado de https://marviva.net/wp-content/uploads/2022/04/10D8-Contaminación-plásticos-CARTILLA-DIGITAL-WEB.pdf

Echajaya Murcia, D. A., & Orjuela Sarmiento, L. A. (2021). *Diseño de un modelo piloto para el reciclaje de PET (Polietilentereftalato) en la localidad de Suba (Bogotá D.C.)*. Bogotá D.C.: Universidad El Rosario. doi:https://doi.org/10.48713/10336_33176

Ecorecyclar. (2022). *PMIRS (Plan de Manejo Integral de Residuos Sólidos)*. Obtenido de Ecorecyclar: https://www.ecorecyclar.org/pmirs-plan-de-manejo-integral-de-residuos-solidos/

EcuRed. (2022). *Bogotá*. Obtenido de EcuRed: https://www.ecured.cu/Bogot%C3%A1

Ellen MacArthur Foundation. (2022). *Economía Circular*. Obtenido de Ellen MacArthur Foundation: https://archive.ellenmacarthurfoundation.org/es/economia-

circular/concepto#:~:text=Respaldada%20por%20una%20transici%C3%B3n%20a,Regenerar%20sistemas%20naturales

Elsevier. (2022). *Journals: Journal of Cleaner Production*. Obtenido de Elsevier Web Site: https://www.journals.elsevier.com/journal-of-cleaner-production

Elsevier. (2022). *Journals: Waste Management*. Obtenido de Elsevier Web site: https://www.journals.elsevier.com/waste-management

Elsevier. (2022). *Scopus: Expertly curated abstract & citation database*. Obtenido de Elsevier web site: https://www.elsevier.com/solutions/scopus

ENDA AL- Colombia. (2017). *¿Quienes somos? ENDA Colombia*. Obtenido de ENDA Colombia - Medio ambiente y desarrollo: http://www.endacol.com/quienes-somos/

ENDA AL- Colombia. (2022). *Proyecto: Género y Cambio Climático- Colombia.*

EPA. (21 de Diciembre de 2021). *Recycling Basics*. Obtenido de United States Environmental Protection Agency: https://www.epa.gov/recycle/recycling-basics

EPA. (2022). *What is a circular economy and why is it important?* Obtenido de United States Environmental Protection Agency: https://www.epa.gov/recyclingstrategy/what-circular-economy

Escorcia Otalora, T. A. (2008). *El análisis bibliométrico como herramienta para el seguimiento de publicaciones científicas, tesis y trabajos de grado.* Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ciencias. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana. Obtenido de https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/8212/tesis209.pdf

Estrada Rudas, C. (17 de Septiembre de 2021). *Colombia recicla material plástico por un aproximado de 300.000 a 350.000 toneladas por año*. Obtenido de La Republica: https://www.larepublica.co/especiales/la-revolucion-del-plastico/colombia-recicla-material-plastico-por-un-aproximado-de-300-000-a-350-000-toneladas-por-ano-3233728

Fundación botellas de amor. (2022). *Respuesta a preguntas frecuentes*. Obtenido de botellasdeamor.org: https://botellasdeamor.org/wp-content/themes/botellas-de-amor/library/pdf/Preguntas-Frecuentes.pdf

Fundación para la Economía Circular. (2017). *Economía Circular: Origen*. Obtenido de La Fundación para la Economía Circular: https://economiacircular.org/economia-circular/

Gobierno de la República de Colombia. (2019). *Estrategia nacional de economía circular. Cierre de ciclos de materiales, innovación tecnológica, colaboración y nuevos modelos de negocio.* Presidencia de la República; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; Ministerio de Comercio, Industria y Turismo., Bogotá D.C. Obtenido de https://www.andi.com.co/Uploads/Estrategia%20Nacional%20de%20EconA%CC%83%C2%B3mia%20Circular-2019%20Final.pdf_637176135049017259.pdf

Gutiérrez Ávila, G. E. (2021). *Análisis Cuantitativo de las Producciones Científicas en Colombia y en los Países Líderes en Investigación, Sobre el Desarrollo de Nuevas Tecnologías Aplicadas a la*

Prestación del Servicio de Agua Potable. Informe para optar por el título de Ingeniero Ambiental, Universidad Santo Tomás, Facultad de Ingeniería Ambiental, Bogotá.

Grajales Quintero, A., Serranomoya, E. D., & Von-H., C. M. H. (2013). Los métodos y procesos multicriterio para la evaluación. *Revista Luna Azul (On Line)*, *36*, 285–306. Recuperado de https://revistasojs.ucaldas.edu.co/index.php/lunazul/article/view/1668

Grigore, M. E. (2017). Methods of Recycling, Properties and Applications of Recycled Thermoplastic Polymers. *Recycling*, *2*(4). https://doi.org/10.3390/recycling2040024

Guerrero Contreras, S. (2018). Análisis de factibilidad para la creación de una empresa peletizadora de pet recuperado a partir de envases en la ciudad de Bogotá (Universidad Santo Tomás). Universidad Santo Tomás, Bogotá. Recuperado de http://hdl.handle.net/11634/14767

Hernández Gómez, D. S., & Gómez Sotelo, N. (2021). *Alternativas de economía circular para incrementar la eficiencia de los recursos de una empresa textil, caso Infinita Estampa.* Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de: Ingeniero Ambiental, Universidad El Bosque, Facultad de Ingeniería, Bogotá. Obtenido de https://repositorio.unbosque.edu.co/bitstream/handle/20.500.12495/7259/2002-019.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Hernández Márquez, D. J. (2017). *Compactación final de PET basado en un programador lógico controlable.* Reporte Técnico de Residencia Profesional, Ingeniería eléctrica, Tecnológico Nacional de México Campus Tuxtla Gutiérrez, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. Obtenido de http://repositoriodigital.tuxtla.tecnm.mx/xmlui/handle/123456789/1444

Hernández Sampieri, R. (2018). *Metodología de la Investigación: Las Rutas Cuantitativa, Cualitativa y Mixta.* McGraw-Hill Interamericana. Recuperado de https://books.google.es/books?id=5A2QDwAAQBAJ

Hurtado, T., & Bruno, G. (2005). *El Proceso de análisis jerárquico (AHP) como herramienta para la toma de decisiones en la selección de proveedores.* Universidad Nacional de San Marcos, Facultad de Ciencias Matemáticas. Lima: Universidad Nacional de San Marcos. . Obtenido de https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/tesis/basic/toskano_hg/cap3.PDF

IDECA. (23 de Agosto de 2022). *Ordenamiento territorial: Localidad. Bogotá D.C.* Obtenido de La IDE de Bogotá: https://www.ideca.gov.co/recursos/mapas/localidad-bogota-dc

INTOSAI. (2022). *Mooc: Auditing Waste Management. 1.1. Definition and classification of waste*. Obtenido de INTOSAI Working Group on Environmental Auditing: https://sisu.ut.ee/waste/book/11-definition-and-classification-waste

Intype Enterprise Co. (2022). *Máquina peletizadora tipo anillo de agua*. Obtenido de Intype Enterprise Co Sitio web: https://www.intype.com.tw/es/product/water-ring-type-pelletizing-machine_TWP-REG.html

Jones, H., Saffar, F., Koutsos, V., & Ray, D. (2021). Polyolefins and Polyethylene Terephthalate Package Wastes: Recycling and Use in Composites. *Energies*, *14*(21). https://doi.org/10.3390/en14217306

Larue, C., De Lassus, C., & Moguel y Anza, A. (2017). *Cómo lograr un reciclaje confiable, eficiente y sustentable a través de la economía circular en América Latina.* FUNDES Latinoamérica, Whitepaper. FUNDES Latinoamérica. Obtenido de https://www.coleccionimpacto.org/sites/default/files/content/02.%20FUNDES_Whiteppaper%20FUNDES_Reciclaje.pdf

Machado, G. F. (2005). *Estudio de impacto ambiental para la construcción y funcionamiento de la planta de agua potable del sistema Culebrillas.* Obtenido de https://www.etapa.net.ec/Portals/0/Agua%20Potable/ingProyectos/Cap%C3%ADtulo%204.%20Comp%20Amb%20Alternativas.pdf

Mangold, H., & von Vacano, B. (2022). The Frontier of Plastics Recycling: Rethinking Waste as a Resource for High-Value Applications. *Macromolecular Chemistry and Physics*, *223*(13), 2100488. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/macp.202100488

Markarian, J. (2004). Pelletizing: choosing an appropriate method. *Plastics, Additives and Compounding*, *6*(4), 22–26. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1464-391X(04)00235-1

Martínez Olmedo, E. (2013). *Tipo, Alcance y Diseño de la Investigación.* Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Sistema de Universidad Virtual. México: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Obtenido de https://www.uaeh.edu.mx/docencia/VI_Lectura/maestria/documentos/LECT85.pdf

McGill University. (2022). *Environmental Engineering*. Obtenido de McGill University Civil Engineering: https://www.mcgill.ca/civil/undergrad/areas/environmental

MDPI. (2022). *Journals: Polymers*. Obtenido de MDPI Web Site: https://www.mdpi.com/journal/polymers

Merritt H., C. (01 de abril de 2019). *Pautas para seleccionar el sistema correcto de peletizado*. Obtenido de Plastics Technology México: https://www.pt-mexico.com/articulos/pautas-para-seleccionar-el-sistema-correcto-de-peletizado

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). *Plan Nacional para la gestión sostenible de plásticos de un solo uso.* Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Mesa Nacional para la gestión sostenible del plástico, Gobierno de la República de Colombia, Bogotá. Obtenido de https://economiacircular.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/09/PLAN-NACIONAL-PARA-LA-GESTION-SOSTENIBLE-DE-LOS-PLASTICOS-DE-UN-SOLO-USO.pdf

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (24 de marzo de 2022). *Flujo de Materiales de Envases y Empaques*. Obtenido de Estrategia Nacional de Economía Circular: https://economiacircular.minambiente.gov.co/index.php/lineas-de-accion/flujo-de-materiales-de-envases-y-empaques/

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (17 de Mayo de 2022). *Hoy no se habla de basura, sino de residuos que son insumos para productos: Minambiente*. Obtenido de Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible: Noticias: https://www.minambiente.gov.co/asuntos-

ambientales-sectorial-y-urbana/hoy-no-se-habla-de-basura-sino-de-residuos-que-son-insumos-para-productos-minambiente/

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022). *Sobre el Ministerio*. Obtenido de minambiente.gov.co: https://www.minambiente.gov.co/sobre-el-ministerio/

Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio. (2022). *Ministerio: misión y visión*. Obtenido de minvivienda.gov.co: https://minvivienda.gov.co/ministerio

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (31 de octubre de 2020). *Herramientas para la Formalización de Recicladores de Oficio*. Obtenido de Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia: https://minvivienda.gov.co/node/24563

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2022). *Planes de gestión integral de residuos sólidos*. Obtenido de Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia: https://www.minvivienda.gov.co/viceministerio-de-agua-y-saneamiento-basico/gestion-institucional/gestion-de-residuos-solidos/planes-de-gestion-integral-de-residuos-solidos

Minneboo, M. (04 de junio de 2019). *Recycling in Colombia*. Obtenido de Plastic Oceans International: https://plasticoceans.org/recycling-in-colombia/

Miranda, D. (julio de 03 de 2022). *20 datos sobre el problema del plástico en el mundo*. Obtenido de National Geographic España: https://www.nationalgeographic.com.es/mundo-ng/20-datos-sobre-problema-plastico-mundo_15282

Miró, Ò., & Burbano, P. (2013). El factor de impacto, el índice h y otros indicadores bibliométricos. *Anales del Sistema Sanitario de Navarra*, *36*, 371–377.

Morales Garzón, J. L. (2016). *Diseño de una Máquina Aglutinadora Para Reciclaje de Bolsas Plásticas de Polietileno de Baja Densidad.* Proyecto integral de grado para optar al título de: Ingeniero mecánico, Fundación Universidad de América, Bogotá. Obtenido de https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/822/1/4082063-2016-2-IM.pdf

Nanda, S., & Berruti, F. (2021). A technical review of bioenergy and resource recovery from municipal solid waste. *Journal of Hazardous Materials, 403*. doi:https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123970

Naranjo Tabaco, R. M. (2016). *Estudio de factibilidad para la creación de una empresa de recolección compactación y comercialización de material PET en el municipio de Yopal departamento de Casanare.* Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD. Recuperado de https://repository.unad.edu.co/handle/10596/8592

NCU & UAESP. (2017). *Consultoría: Realizar el estudio técnico de la caracterización en la fuente de residuos sólidos generados en la Ciudad de Bogotá Distrito Capital por tipo de generador y establecer el uso de métodos alternativos de transporte para materiales aprovechables.* Consultoría, Bogotá. Obtenido de https://www.uaesp.gov.co/sites/default/files/documentos/Resumen%20ejecutivo.pdf

Núñez Amórtegui, D. L. (2016). *Conflictos y alternativas para el reconocimiento de la población de recicladores dentro de la gestión de residuos sólidos de Bogotá.* Instituto de Estudios

Ambientales de la Universidad Nacional de Colombia. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/58264/1032389671.2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Onogawa, K., Dickella Gamaralage, J. P., Adhikari, A., Singh, R., Shroff, S., Thakur, R., … Chaturvedula, S. (2021). *Compendium of Technologies for Plastic Waste Recycling*. New Delhi, India, . Recuperado de https://circulars.iclei.org/wp-content/uploads/2022/09/Technology_Compendium_Designed_Final.pdf

Otero Ortega, A. (2018). *Enfoques de investigación. Métodos para el diseño urbano–Arquitectónico.* Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Alfredo-Otero-Ortega/publication/326905435_ENFOQUES_DE_INVESTIGACION/links/5b6b7f9992851ca650526dfd/ENFOQUES-DE-INVESTIGACION.pdf

Pascuas Rengifo, Y. S. . (2014). *Compilado Unidad Temática Metodología De La Investigación*. Recuperado de https://www.uniamazonia.edu.co/documentos/docs/Programas Academicos/Tecnologia en Informatica y sistemas/Compilados/Compilado Metodologia de la Investigacion.pdf

Patzi Canaza, G. (2015). *Estudio de un proceso tecnológico para el reciclaje de botellas PET.* Proyecto de grado para obtener el título académico de licenciatura en quimica industrial, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia. Obtenido de https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/9301/PG-1582-Patzi%20Canaza%2c%20Grover.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Paz, M. (2016). *Reciclado de PET a partir de botellas post consumo.* Proyecto integrador: Escuela de Ingeniería Industrial, Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Córdoba. Obtenido de https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/5567/PAZ%2C%20MARIA%20-%20PI%20Reciclado%20de%20PET%20a%20partir%20de%20botellas%20post%20consumo.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Pérez Porto, J., & Gardey, A. (2017). *Definición de basura*. Obtenido de Definición de: https://definicion.de/basura/

Prajapati, R., Kohli, K., Maity, S. K., & Sharma, B. K. (2021). Recovery and Recycling of Polymeric and Plastic Materials. En J. Parameswaranpillai, S. Mavinkere Rangappa, A. Gulihonnehalli Rajkumar, & S. Siengchin (Eds.), *Recent Developments in Plastic Recycling* (pp. 15–41). Singapore: Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-3627-1_2

Prata, J. C., Silva, A. L. P., Walker, T. R., Duarte, A. C., & Rocha-Santos, T. (2020). COVID-19 Pandemic Repercussions on the Use and Management of Plastics. *Environmental Science & Technology*, *54*(13), 7760–7765. https://doi.org/10.1021/acs.est.0c02178

Rammert, W. (2001). La tecnología: Sus formas y las diferencias de los medios. Hacia una teoría social pragmática de la tecnificación. *Revista electronica de geografía y ciencias sociales*(5). Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/28054841_La_tecnologia_Sus_formas_y_las_diferenc

ias_de_los_medios_Hacia_una_teoria_social_pragmatica_de_la_tecnificacion#:~:text=Citations%20(9)-,Abstract,el%20conjunto%20de%20artefactos%20materiales.

Reike, D., Vermeulen, W. J. V, & Witjes, S. (2018). The circular economy: New or Refurbished as CE 3.0? — Exploring Controversies in the Conceptualization of the Circular Economy through a Focus on History and Resource Value Retention Options. *Resources, Conservation and Recycling*, 135, 246–264. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.027

Responsabilidad Social Empresarial (RSE). (8 de enero de 2022). *Basura: qué es, definición, clasificación, manejo y ejemplos*. Obtenido de Responsabilidad Social Empresarial y Sustentabilidad: https://responsabilidadsocial.net/basura-que-es-definicion-clasificacion-manejo-y-ejemplos/?amp

Riestra, L. (2018). Las Dimensiones del Desarrollo Sostenible como Paradigma para la Construcción de las Políticas Públicas en Venezuela. *Tekhné, 21*(1), 1-10. Obtenido de https://revistasenlinea.saber.ucab.edu.ve/index.php/tekhne/article/view/3543

Rincón Garzón, L., Rodríguez Carmona, E., & Espitia Cubillos, A. (2016). Madera plástica. Un producto amigo del planeta. *Semilleros, III*(5), 41-48. Obtenido de https://revistas.fio.unam.edu.ar/index.php/semillero/article/download/71/71

Rivera Botero, C., & Patiño Tejada, J. D. (2021). *El reúso del plástico de un solo uso una alternativa bioempresarial.* Boletín Ambietal, Universidad Nacional de Colombia, Instituto de Estudios Ambientales IDEA - Sede Manizales, Caldas. Obtenido de http://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/81807

Rivera Villar, W. N. (2019). Sistema de transformación y reutilización de residuos plásticos. *Universidad El Bosque*. Bogotá: Universidad El Bosque. Recuperado de http://hdl.handle.net/20.500.12495/2962

Robayo, L. (04 de agosto de 2019). *Fundación Botellas de Amor: un modelo de reciclaje que cautiva*. Obtenido de Mundo PMMI: https://www.mundopmmi.com/empaque/sustentabilidad/article/14037922/fundacin-botellas-de-amor-un-modelo-de-reciclaje-que-cautiva

Salamanca Galvis, L. V. (09 de diciembre de 2021). *Estrategia Nacional de Economía Circular: ¿en qué va el país?* Obtenido de Consejo Colombiano de Seguridad (CCS): https://ccs.org.co/portfolio/estrategia-nacional-de-economia-circular-en-que-va-el-pais/

Salcedo Reina, M. P. (2021). *Modelo de gestión de plástico tipo PET en la ciudad de Bogotá para su reutilización y transformación a fibras o materiales de uso textil* (Pontificia Universidad Javeriana). Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá. Recuperado de http://www.grif.umontreal.ca/acciones/contenu_pages/Informe-beca-PUJ-Salcedo.pdf

Sánchez Rico, A. P. (2019). *Vigilancia tecnológica y prospectiva tecnológica, disciplinas que generan insumos para el diseño de políticas de ciencia, tecnología e innovación.* Instituto Tecnológico de Buenos Aires - ITBA, Escuela de Organización Industrial de España - EOI. Buenos Aires: Instituto Tecnológico de Buenos Aires. Obtenido de

https://ri.itba.edu.ar/server/api/core/bitstreams/568c7eac-6fc1-4389-9630-06b38b74189c/content

Sánchez-Muñoz, M. d., Cruz Cerón, J. G., & Giraldo Uribe, J. J. (2019). Análisis de la opinión de los hogares sobre la gestión de los residuos sólidos domiciliarios en Bogotá. *Semestre Económico, 22*(52). doi:https://doi.org/10.22395/seec.v22n52a5

ScienceDirect. (2022). *Journals & Books: Construction and Building Materials*. Obtenido de ScienceDirect Web Site: https://www.sciencedirect.com/journal/construction-and-building-materials

Secretaría Distrital de Ambiente. (17 de Mayo de 2022). *¿Cuáles son y dónde se disponen las basuras especiales y peligrosas?* Obtenido de Secretaría Distrital de Ambiente: Noticias de ambiente: https://ambientebogota.gov.co/es/noticias-de-ambiente/cuales-son-y-que-hacer-con-los-residuos-especiales-y-peligrosos

Secretaría Distrital de Ambiente. (2022). *Información de la entidad: Misión, visión, funciones y deberes*. Obtenido de Secretaría Distrital de Ambiente: https://www.ambientebogota.gov.co/web/sda/funciones

Secretaría Distrital de Ambiente. (2022). *La entidad*. Obtenido de Secretaría Distrital de Ambiente: https://ambientebogota.gov.co/la-entidad

Secretaría Distrital de Integración Social. (2022). *11. Localidad de Suba*. Obtenido de Secretaría Distrital de Integración Social: https://www.integracionsocial.gov.co/index.php/entidad/informacion-institucional/localidades-sdis/11-suba

SIAC. (2022). *Residuos*. Obtenido de IDEAM: http://www.ideam.gov.co/web/siac/residuos#:~:text=De%20acuerdo%20al%20Decreto%204741,sus%20propiedades%20no%20permiten%20usarlo

Silva Salamanca, Z. A., & Mejía Osorio, D. C. (2020). *Estudio del manejo de residuos plásticos en Colombia.* Tecnológico de Antioquia, Institución Universitaria. Medellín: Tecnológico de Antioquia, Institución Universitaria. Obtenido de https://dspace.tdea.edu.co/handle/tdea/952

Suarez Sánchez, A. (2013). *Propuesta para el tratamiento y aprovechamiento del plástico en el relleno sanitario de Quinchía, Risaralda.* Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Ingeniería Mecánica . Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira. Obtenido de https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/901ec637-2ddc-4616-8597-5e3340d6a79e/content

Suárez Zarta, D. (09 de Marzo de 2016). *Solo 26% de las botellas plásticas se recicla*. Obtenido de Diario La República: https://www.larepublica.co/responsabilidad-social/solo-26-de-las-botellas-plasticas-se-recicla-2357536

Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2022). *Nuestra entidad: quienes somos*. Obtenido de Superservicios - Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios: https://www.superservicios.gov.co/Nuestra-entidad/quienes-somos

Superservicios & DNP. (2021). *Informe Nacional de Disposición Final de Residuos Sólidos 2020.* Bogotá: Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. Obtenido de https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/informe_df_2020%20%281%29.pdf

Superservicios & DNP. (2022). *Informe sectorial de la actividad de aprovechamiento 2020.* Superintendecia de Servicios Públicos Domiciliarios, Bogotá. Obtenido de https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/Informe-Sectorial-de-Aprovechamiento-2020-v2.pdf

Tapia Lemos, J. D. (2018). *Diseño de una compactadora horizontal de plástico reciclado para el centro de reciclaje REIPA.* Tesis (Ingeniero Mecánico), Universidad San Francisco de Quito, Colegio de Ciencias e Ingenierías, Quito. Obtenido de https://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/7985/1/141268.pdf

TEVA Distribuidora. (2022). *Dado plano: extrusora de lámina película PET*. Obtenido de TEVA Distrivuidora - sitio web: https://www.maquinariaparaplastico.com/dado-plano

Tipán, R., Mora, V., & Altamirano, E. (2019). Diseño e Implementación de un Sistema Automático Compactador PET Utilizando Elementos Hidráulicos: Array. *Revista Perspectivas*, *1*(1), 36–41. https://doi.org/10.47187/perspectivas.vol1iss1.pp36-41.2019

Tournier, V., Topham, C. M., Gilles, A., David, B., Folgoas, C., Moya-Leclair, E., … Marty, A. (2020). An engineered PET depolymerase to break down and recycle plastic bottles. *Nature*, *580*(7802), 216–219. https://doi.org/10.1038/s41586-020-2149-4

Tovar, L. F. (2018). Formalización de las organizaciones de recicladores de oficio en Bogotá: reflexiones desde la economía popular. *Íconos. Revista de Ciencias Sociales*. doi:https://doi.org/10.17141/iconos.62.2018.3230

UAESP. (2011). *Objetivos Estratégicos*. Obtenido de Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos -UAESP-: https://www.uaesp.gov.co/content/objetivos-estrategicos

UAESP. (mayo de 2018). *Plan Maestro para el Manejo Integral de Residuos Sólidos para Bogotá D.C.* Obtenido de Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos - UAESP: https://www.uaesp.gov.co/transparencia/planeacion/planes/plan-maestro-manejo-integral-residuos-s%C3%B3lidos-bogot%C3%A1-dc-1

UAESP. (2021). *Modelo De Aprovechamiento: La basura no es basura. "Hacía una cultura de aprovechamiento y valorización de residuos sólidos en Bogotá D.C.".* Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos - UAESP, Alcaldía Mayor de Bogotá & Secretaria Distrital de Hábitat, Subdirección de Aprovechamiento, Bogotá. Obtenido de https://www.uaesp.gov.co/sites/default/files/20210420_Modelo_de_aprovechamiento.pdf

UAESP. (2022). *Registro Único de Organizaciones de Recicladores -RUOR-*. Bogotá: UAESP. Obtenido de https://www.uaesp.gov.co/content/generalidades-del-registro-unico-organizaciones-registradores-segun-tipologia-ruor

UAESP. (2022). *Registro Único de Recicladores de Oficio - RURO*. Bogotá: Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos - UAESP. Obtenido de https://www.uaesp.gov.co/content/generalidades-del-registro-unico-registradores-oficio-ruro

UAESP, & Olaya, D. (junio de 2022). *Recicladores beneficiados con incentivos de la UAESP*. Obtenido de UAESP: https://www.uaesp.gov.co/noticias/recicladores-beneficiados-incentivos-la-uaesp#:~:text=Publicado%20el%3A%20Junio%202022&text=Respondiendo%20a%20las%20necesidades%20de,asociaciones%20de%20recicladores%20en%20Bogot%C3%A1.

Universidad El Bosque. (2022). *Acerca del pregrado en Ingeniería Ambiental - Características del estudiante: perfil del egresado*. Obtenido de Universidad El Bosque sitio web: https://www.unbosque.edu.co/ingenieria/carrera/ingenieria-ambiental?utm_source=google&utm_medium=cpl&utm_campaign=lead-ok_ingenieria-ambiental&utm_content=texto&gclid=EAIaIQobChMI0ZuurbWY-wIVhcmGCh1-_goTEAAYASAAEgJ2g_D_BwE

Universidad El Bosque. (2022). *Alma Mater*. Obtenido de Universidad El Bosque: https://www.unbosque.edu.co/nuestro-bosque/alma-mater

Vargas Pacheco, H. (2022). *Guía Para la Visualización de Datos: Bibliometrix*. Bogotá. Recuperado de https://ciencia.lasalle.edu.co/recursos_bibliograficos/30/

Vargas, W. (5 de Marzo de 2022). *Manejo Integral de los Residuos Sólidos en Bogotá: desafíos para Bogotá*. Obtenido de Instituto de Estudios Urbanos - IEU. Universidad Nacional de Colombia: http://ieu.unal.edu.co/medios/noticias-del-ieu/item/manejo-integral-de-los-residuos-solidos-en-bogota-desafios-para-bogota

Victoria Calambas, F. A., Marmolejo Rebellón, L. F., & Torres Lozada, P. (2012). Alternativas para fortalecer la valorización de materiales reciclables en plantas de manejo de residuos sólidos en pequeños municipios. *Ciencia e ingeniería neogranadina*, *22*(1), 59-73. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0124-81702012000100004

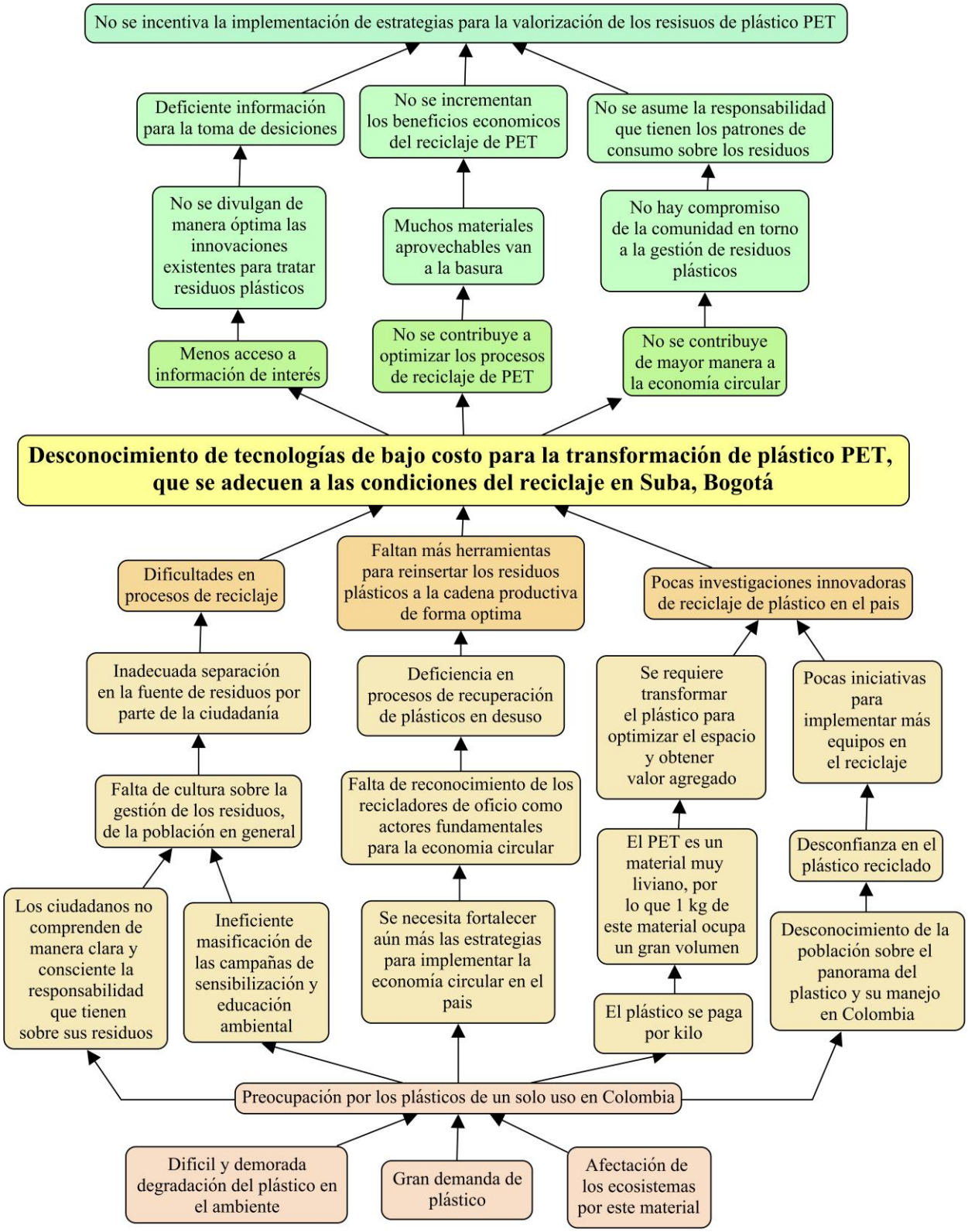
Vilaplana, F., & Karlsson, S. (2008). Quality Concepts for the Improved Use of Recycled Polymeric Materials: A Review. *Macromolecular Materials and Engineering*, *293*(4), 274-297. doi:https://doi.org/10.1002/mame.200700393

Wagner, J. R., Mount, E. M., & Giles, H. F. (2014). 44 - Compounding. En J. R. Wagner, E. M. Mount, & H. F. Giles (Eds.), *Extrusion (Second Edition)* (pp. 505–515). Oxford: William Andrew Publishing. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-3481-2.00044-2

Winterich, K. P., Nenkov, G. Y., & Gonzales, G. E. (2019). Knowing What It Makes: How Product Transformation Salience Increases Recycling. *Journal of Marketing*. doi:https://doi.org/10.1177/0022242919842167

Yoshida, S., Hiraga, K., Takehana, T., Taniguchi, I., Yamaji, H., Maeda, Y., … Oda, K. (2016). A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). *Science*, *351*(6278), 1196–1199. https://doi.org/10.1126/science.aad6359

Zapata Bravo, Á., Vieira Escobar, V., Zapata-Domínguez, Á., & Rodríguez-Ramírez, A. (Mayo-Agosto de 2021). The Circular Economy of PET bottles in Colombia. *Cuadernos de Administración, 37*(70), 23. doi:https://doi.org/10.25100/cdea.v37i70.10912

Anexos

Anexo 1. Árbol de problemas del proyecto