

Mapa de Ruta Tecnológico para Minimizar los Impactos Ambientales, Generados por los Residuos Plásticos Relacionados con el COVID-19, Caso de Estudio: Área Metropolitana de

Bucaramanga (AMB)

Sandra Paola Peña Ruiz

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniera Química

Director

Viatcheslav Kafarov

Doctor Sc. Ingenier habil

Codirectora

Lynda Valentina Carreño Villareal

Ingeniera Química

Codirector

Andrés Felipe León Esteban

Magíster en Economía

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

A mis amados padres Rogelio Peña y María Ruiz por enseñarme a enfrentar cada problema de la vida, por dedicar su vida entera a mi bienestar, protección y felicidad, por ser mi más grande alegría e inspiración.

A todos mis hermanos Abundio, Nelson, Olga, Luis, Lelio, Marcos, Mila, Jorge y a mi madrina Alcira por todas sus hermosas enseñanzas, por aconsejarme en cada situación y por consentirme incansablemente con todo lo que estuvo a su alcance.

Y dedico especialmente y con el amor más grande del mundo el presente proyecto a mi hermano Nelson, el cual me ha motivado cada día a cumplir con esta meta, aconsejándome y brindándome su máximo apoyo para iniciar la carrera y el cual no permitió que me rindiera en los semestres difíciles. Al hombre que primero pensó en el bienestar de los demás y claramente en el mío antes que el mismo, a quien ha cargado con toda la responsabilidad de mis acciones sin objeción alguna. A ti mi moreno, gracias mil gracias, por ser mi inspiración y mi ejemplo a seguir, por consentirme tanto, por cumplir mis caprichos, y sobre todo por ser la luz en mi camino, por no dejarme caer ni permitir que me desanime en los tiempos de dificultad, gracias por brindarme todos los medios para ser feliz. Agradezco con mi vida entera, la fé, confianza y completa entrega hacia mi formación personal y profesional. Muchísimas gracias por creer en mí, gracias por todo, te amo.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por siempre iluminar mi camino y llenarme de sabiduría y de fuerzas para continuar en momentos difíciles.

A mis papás que siempre están a mi lado y oran diariamente por mi bienestar y a mis hermanos por su ayuda, amor y acompañamiento en todo momento.

A mis familiares, mis sobrinos y seres queridos que me han apoyado de una forma u otra a lo largo de mi carrera, a mi sobrino por sacar de su tiempo para guiarme con sus habilidades y a mi prima Elvia por su gran y sincera ayuda en los inicios de mi carrera.

A mis dos mejores amigas, Magda e Ivón y a sus familias por hacer mi vida más bonita, por llenarme de alegrías, por ayudarme y motivarme siempre.

A mi director Viatcheslav Kafarov y Codirectores Andrés León y Lynda Carreño por permitirme participar en este proyecto, por su paciencia, recomendaciones y correcciones realizadas.

A los profesores y administrativos de la sede Barbosa, que con mucho cariño me acogieron y ayudaron en todo lo que estuvo a su alcance, especialmente a la Psicóloga Marcela Galeano, a la profesora Yusleiny Saavedra, a la profesional Aida Ardila, al profesor Víctor H. Cely y a la Profesora Martha Cárdenas.

A la profesora Sandra Fontecha y a la Dra. Yurany Camacho por su excepcional ayuda académica y emocional, por ser excelentes profesionales, dispuestas a ayudar de corazón, compartir su tiempo, brindar apoyo y motivación en cada adversidad.

Y agradezco a la Universidad Industrial de Santander el apoyo financiero de la investigación mediante la convocatoria interna "Aportes de la UIS frente a la pandemia de COVID-19" en el marco del proyecto "Mapa de ruta para minimizar los impactos ambientales y los riesgos para la salud humana generados por los residuos plásticos relacionados con COVID-19 en el Área Metropolitana de Bucaramanga", código número 2728.

Contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Estado del Arte.....	13
2. Objetivos.....	15
2.1. Objetivo General.....	15
2.2. Objetivos Específicos.....	15
3. Metodología	16
3.1. Etapa I. Diagnóstico de Tecnologías de Tratamiento de Residuos Plásticos	16
3.2. Etapa II. Diagnóstico de Tecnologías de Tratamiento de Residuos en el AMB.....	17
3.3. Etapa III. Construcción del Mapa de Ruta Tecnológico.....	17
4. Resultados Etapa I.....	18
4.1. Diagnóstico sobre las Tecnologías para la Gestión de Residuos Plásticos.....	19
4.1.1. Residuos Plásticos en Colombia Generados Antes y Después de la Pandemia.....	19
4.1.2. Tecnologías de Tratamiento de Residuos Plásticos Existentes.....	22
5. Resultados Etapa II	24
5.1 Tecnologías de Tratamiento de Residuos Plásticos en Colombia	24
5.2 Nuevas Tecnologías de Tratamiento de Residuos en Colombia.....	25
5.3. Área Metropolitana de Bucaramanga	26
5.3.1. Tecnologías de Tratamiento de Residuos Plásticos Empleados Actualmente en el AMB.	27
5.3.2. Residuos Plásticos Procesados Durante la Pandemia COVID-19 en el AMB.	27
5.3.3. Acciones Clave para Mejorar los Procesos Existentes en el AMB	30
6. Resultados Etapa III.....	31

MAPA DE RUTA PARA MINIMIZAR IMPACTOS AMBIENTALES	5
6.1. Construcción del Mapa de Ruta Tecnológico	31
6.2 Método Propuesto	33
6.3 Aplicación y Alcance del Método al Área Metropolitana de Bucaramanga.	34
6.4 Análisis de Tecnologías y Escenarios Futuros.....	34
6.5 Visión, Objetivos y Barreras.....	40
6.6 Hitos, Elementos de Acción y Plazos	41
7. Conclusiones	44
8. Recomendaciones	46
Referencias Bibliográficas	47
Apéndices.....	57

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Toneladas Anuales de Residuos Sólidos Dispuestos y Aprovechados en Colombia</i>	19
Tabla 2. <i>Porcentajes de Variación de Aprovechamiento de Residuos Sólidos.....</i>	20
Tabla 3. <i>Distribución por Tipo de Tecnología de Tratamiento de Residuos Peligrosos.....</i>	25

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Esquema de la Metodología</i>	16
Figura 2. <i>Etapas de una Vigilancia Tecnológica</i>	18
Figura 3. <i>Porcentajes de Recuperación y Disposición Final de Residuos Sólidos</i>	23
Figura 4. <i>Tecnologías de Tratamiento de Residuos Sólidos Orgánicos</i>	26
Figura 5. <i>Cantidad Estimada de Residuos Plásticos Generados por Año para el AMB</i>	28
Figura 6. <i>Proyección de Residuos Plásticos Generados Antes y Después del COVID-19</i>	30
Figura 7. <i>Elementos Clave de un Mapa de Ruta Tecnológico</i>	33
Figura 8. <i>Evolución en Investigación de las Tecnologías WtE</i>	36
Figura 9. <i>Comparativo de Cada Tecnología en Producción de kWh, CO₂ y US/kWh</i>	38
Figura 10. <i>Proyecciones de Aplicación de las 3 Tecnologías en el AMB</i>	39
Figura 11. <i>Proyección de Emisiones de CO₂ para el AMB Antes y Post COVID-19</i>	40
Figura 12. <i>Establecimiento de Acciones para el Mapa de Ruta Tecnológico</i>	43

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. <i>Tratamientos Actuales para Residuos Sólidos en Colombia.</i>	57
Apéndice B. <i>Residuos Plásticos Gestionados por las Empresas Bello Renacer y Descot</i>	60
Apéndice C. <i>Tecnologías para Mejorar el Sistema de Reciclaje</i>	63
Apéndice D. <i>Referencias Mundiales para Comparativo de Eficiencia de las Tecnologías.</i>	66
Apéndice E. <i>Descripción Detallada para las Acciones de la Trayectoria 1, 2 y 3</i>	69
Apéndice F. <i>Productos de Investigación</i>	72

Resumen

Título: Mapa de ruta tecnológico para minimizar los impactos ambientales, generados por los residuos plásticos relacionados con el COVID-19, caso de estudio: Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB)*

Autor: Sandra Paola Peña Ruiz**

Palabras Clave: Residuos plásticos, gestión de residuos plásticos, pandemia de COVID-19, mapa de ruta tecnológico.

Descripción:

El Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB) está ubicada en la región nororiental de Colombia y está conformada por los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta. Actualmente, el AMB tiene problemas relacionados con el aprovechamiento y la eliminación de los residuos plásticos, los cuales han aumentado últimamente debido a la pandemia de COVID-19 por la utilización de plásticos de un solo uso para evitar la propagación del virus. Esto ha generado dificultades en la gestión de los residuos plásticos en la ciudad, como la baja tasa de actividades de recolección de basura y reciclaje, incremento de volumen de residuos en el relleno sanitario “El Carrasco” y la creciente contaminación del agua, la tierra y el aire; poniendo en riesgo los ecosistemas y los habitantes de la región. El objetivo principal de este proyecto es presentar un conjunto de actividades para responder al aumento repentino de residuos plásticos relacionados con el COVID-19, mediante el desarrollo e implementación de un mapa de ruta tecnológico para el Área Metropolitana de Bucaramanga, el cual podría permitir la minimización de los impactos ambientales, a través de acciones en donde se implementen nuevas tecnologías para la conversión de residuos plásticos en energía, tales como: incineración, pirólisis y gasificación. La implementación se podría dar en un periodo a corto (2023 – 2025), mediano (2026 – 2035) y largo plazo (2036-2050), demostrando para el año 2050 una mejora en la calidad del aire, bajas emisiones por captura de CO₂, reducción en la utilización del relleno sanitario y un alto potencial en reúso y reciclaje por parte de todos los ciudadanos.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingeniería Físicoquímica. Escuela de Ingeniería Química. Director: Viatcheslav Kafarov, Doctor en Ciencias Técnicas. Codirectora: Lynda Valentina Carreño Villareal, Ingeniera Química. Codirector: Andrés Felipe León Esteban, Magister en Economía.

Abstract

Title: Technological roadmap to minimize environmental impacts generated by plastic waste related to COVID-19, case study: Area Metropolitana de Bucaramanga (AMB)*

Author(s): Sandra Paola Peña Ruiz**

Key Words: Plastic waste, plastic waste management, COVID-19 pandemic, technology roadmap.

Description:

The Bucaramanga Metropolitan Area (BMA) is located in the northeastern region of Colombia and is made up of the municipalities of Bucaramanga, Floridablanca, Girón and Piedecuesta. Currently, the BMA has problems related to the use and disposal of plastic waste, which have increased recently due to the COVID-19 pandemic caused by the high use of single-use plastics to prevent the spread of the virus. This has generated difficulties in the management of plastic waste in the city, such as the low rate of garbage collection and recycling activities, increased volume of waste in the landfill "El Carrasco" and the increasing contamination of water, land and air, putting at risk the ecosystems and the inhabitants of the region. The main objective of this project is to present a set of activities to respond to the sudden increase of plastic waste related to COVID-19, through the development and implementation of a technological roadmap for the Bucaramanga Metropolitan Area, which could allow the minimization of environmental impacts, through actions where new technologies are implemented for the conversion of plastic waste into energy, such as: incineration, pyrolysis, and gasification. The implementation could take place in a short (2022 - 2025), medium (2026 - 2035) and long term (2036-2050), demonstrating by the year 2050 an improvement in air quality, low emissions by CO₂ capture, reduction in landfill utilization and a high potential for reuse and recycling by all citizens.

* Degree Work

**Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: Viatcheslav Kafarov, Doctor of Technical Sciences. Co-director: Lynda Valentina Carreño Villareal, Chemical Engineer. Co-director: Andrés Felipe León Esteban, Master in Economics.

Introducción

Entre los productos derivados del petróleo los plásticos han generado una gran problemática a nivel global debido a su impacto sobre el medio ambiente. Además, la pandemia de COVID-19 ha aumentado estos efectos ambientales debido, entre otras cosas, al incremento repentino de plásticos de un solo uso que se destinaron para proteger a la población, complicando el manejo de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) y residuos médicos peligrosos, causando problemas en los sistemas de gestión de residuos sólidos en todo el mundo (Klemeš et al., 2020).

Existen diversas investigaciones y estudios previos que han indicado la importancia de la implementación de técnicas apropiadas para el tratamiento de estos desechos con el fin de reducir su impacto sobre el planeta (Singh et al., 2011). Sin embargo, con la pandemia de COVID-19 el desafío se ha intensificado porque estamos generando tal cantidad de desechos que puede llegar a exceder la capacidad de tratamiento por un gran margen (Klemeš et al., 2020).

En Colombia la crisis ambiental debido al manejo inadecuado de los residuos ya existía antes de la pandemia (Franco Antolinez et al., 2018) pero esta se agudizó por un incremento de hasta cuatro veces en la generación de desechos, debido al alto consumo de productos plásticos de un solo uso como bolsas, envases para alimentos y el equipo que constituye la protección personal como mascarillas, protectores faciales, guantes, entre otros (Saadat et al., 2020), lo que ha generado una emergencia sanitaria en el país. Un ejemplo claro se puede evidenciar en el Área Metropolitana de Bucaramanga con el relleno sanitario “El Carrasco”, un botadero a cielo abierto que ya excedió su capacidad para recibir residuos y está ocasionando un gran daño ambiental y de salud en las personas (Franco Antolinez et al., 2018).

En vista de esta situación la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha recomendado amplificar la eficacia en el manejo y el tratamiento de este tipo de residuos, lo que implica cambios

estructurales en todo el proceso, desde las reglas de clasificación, recolección, separación, almacenamiento, transporte, tratamiento, protocolo de seguridad para los trabajadores de recolección, hasta su eliminación (Flores, 2020), dado que la generación y disposición final de residuos sólidos se ha convertido en un inconveniente a nivel mundial, hasta coexistir con un desorden sanitario, social y económico (Gomez, 2020). Por eso se reconoce la importancia de evaluar diversas opciones con tecnologías de tratamiento ya existentes para presentar algunas alternativas de solución.

En este contexto surge el proyecto en el grupo de investigación CIDES (Centro de Investigación para el Desarrollo Sostenible en Industria y Energía) llamado “Mapa de ruta para minimizar los impactos ambientales y los riesgos en la salud humana, generados por los residuos plásticos relacionados con el COVID-19 en el AMB”, como respuesta a la convocatoria interna de investigación “Aportes UIS frente a la pandemia por el COVID-19” de la Vicerrectoría De Investigación Y Extensión – VIE., este proyecto elabora una prospectiva sobre el manejo de desechos durante y post COVID-19 incentivando el manejo sostenible de los residuos durante y después de la pandemia en el AMB.

Los desafíos emergentes en el manejo de desechos plásticos durante y post COVID-19 serán analizados desde la perspectiva de la implementación de nuevas tecnologías basadas en el concepto de energía limpia. Para lo anterior, se construirá un mapa de ruta tecnológico que establece metas e indicadores de corto, mediano y largo plazo (hasta el año 2050), con el fin de enfrentar el aumento de los residuos plásticos y los impactos ambientales relacionados con el COVID-19, obteniendo opciones sostenibles para el tratamiento de residuos durante y post pandemia, en el AMB.

1. Estado del Arte

Según el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, 2020), la crisis del COVID-19 ha generado un aumento en la generación excesiva de residuos plásticos, alimenticios y biomédicos; provocando problemas en la gestión de desechos sólidos, causando impactos degenerativos en la salud de las personas y el medio ambiente.

Durante un brote se produce una variedad de desechos médicos y peligrosos, que incluyen máscaras, guantes, caretas, batas antifluido y otros equipos de protección personal, así como grandes cantidades de artículos no infectados de la misma naturaleza (UNEP, 2020). Según Tang, 2020, en la ciudad de Wuhan, donde se informó por primera vez de COVID-19, solamente los desechos médicos aumentaron drásticamente de 40 toneladas(ton)/día a unas 240 ton/día.

El rápido aumento del volumen de desechos plásticos ha incrementado las complejidades en la industria de la gestión de residuos sólidos urbanos y la gestión de residuos biomédicos peligrosos (Ferronato & Torretta, 2019), representando una gran amenaza para la salud de las personas y el medioambiente. El problema ambiental clave al que contribuye el plástico no es la producción, sino el uso indiscriminado y especialmente la eliminación inadecuada (Jaromir Klemes & van Fan, 2020). De acuerdo con Klemes et al (2020), los plásticos que no se tratan adecuadamente después del uso, acaban en vertederos o en los océanos; lo que resulta preocupante y lleva a proponer metodologías para su tratamiento adecuado, sin que este tipo de actividad genere mayores impactos al ambiente.

Con soluciones disponibles limitadas, existe una necesidad sustancial de innovaciones que deberían abordar desafíos clave en la recolección de desechos plásticos e incorporar nuevas tecnologías en tratamiento de residuos para recuperar energía en forma de calor, electricidad o combustibles alternos como el biogás, integrándolos al sistema de gestión de desechos existente.

Al tiempo que mejoran la capacidad y la eficiencia de los viejos procesos y tecnologías, estos nuevos avances pueden complementar su capacidad para sostener las próximas oleadas de generación de desechos (Vanapalli et al., 2021).

Los tratamientos basados en energía (microondas, ondas de radio), la incineración y la desinfección química garantizarían la reducción del riesgo de transmisión viral de EPP contaminados y otros plásticos (Rutala & Weber, 2015). China ha proporcionado algunas pautas sugeridas para el tratamiento de emergencia de los desechos peligrosos de COVID-19, como instalaciones municipales de incineradores en horno rotatorio, incineración en horno de lecho fijo, la incineración por pirólisis y tratamientos con gasificación, fortaleciendo la salud, previniendo transmisión de enfermedades y la contaminación ambiental (Zheng et al., 2020).

Una estrategia para reducir los impactos ambientales por el aumento en residuos plásticos (Sharma et al., 2020), es plantear un mapa de ruta tecnológico que evalúe alternativas de tratamiento de residuos para implementarlas mediante actividades a corto, mediano y largo plazo.

Un mapa de ruta tecnológico apoya la planeación, generalmente es un diagrama cronológico con múltiples capas, que presenta los medios para ligar la tecnología y otros recursos a productos futuros, así como también a objetivos de negocios e hitos (Phaal et al., 2001). Describe una dirección completa para el desarrollo o uso de una tecnología (Marta et al., 2010), el cual ayudará en la identificación y selección de soluciones alternativas para tomar decisiones sobre implementación de nuevas tecnologías de tratamiento de residuos plásticos en tiempos de pandemia y post pandemia.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Elaborar un mapa de ruta tecnológico para minimizar los impactos ambientales, generados por los residuos plásticos relacionados con el COVID-19, a través de la evaluación de soluciones tecnológicas. Caso de estudio: Área Metropolitana de Bucaramanga.

2.2. Objetivos Específicos

Elaborar un diagnóstico sobre las tecnologías disponibles en la actualidad para la gestión de residuos plásticos.

Recopilar datos referentes a los métodos existentes para la disposición y tratamiento de residuos plásticos en el Área Metropolitana de Bucaramanga, proponiendo acciones clave de mejora.

Presentar un mapa de ruta tecnológico que permita identificar las acciones y aplicaciones a corto, mediano y largo plazo; para reducir los impactos ambientales generados por los residuos plásticos relacionados con el COVID-19 en el AMB, hasta el año 2050.

3. Metodología

La Figura 1 ilustra el esquema general de la metodología utilizada en el presente proyecto.

Figura 1.

Esquema de la Metodología



3.1. Etapa I. Diagnóstico de Tecnologías de Tratamiento de Residuos Plásticos

Elaborar un diagnóstico sobre las tecnologías disponibles en la actualidad para la gestión de residuos plásticos.

Recolección de datos asociados a residuos plásticos en Colombia generados antes y después de la pandemia.

Revisión bibliográfica acerca de tecnologías de tratamiento de residuos plásticos, existentes y emergentes en Colombia y en diferentes países del mundo.

3.2. Etapa II. Diagnóstico de Tecnologías de Tratamiento de Residuos en el AMB

Recopilar datos referentes a los métodos existentes para la disposición y tratamiento de residuos plásticos en el AMB, proponiendo acciones clave para la mejora de estas.

Revisión bibliográfica acerca de métodos y tecnologías de tratamiento de residuos plásticos empleadas actualmente en el Área Metropolitana de Bucaramanga.

Recopilación de información relacionada con la cantidad de residuos plásticos procesados durante la pandemia COVID-19 en el AMB.

Recomendar acciones clave que ayuden a optimizar los procesos existentes para reducir los impactos ambientales en el Área Metropolitana de Bucaramanga.

3.3. Etapa III. Construcción del Mapa de Ruta Tecnológico

Presentar un mapa de ruta tecnológico que permita identificar las acciones y aplicaciones a corto, mediano y largo plazo; para minimizar los impactos ambientales generados por los residuos plásticos relacionados con el COVID-19 en el AMB, hasta el año 2050.

Analizar las tecnologías de gestión de residuos plásticos y escenarios futuros para la planificación de actividades

Determinar los principales focos de desarrollo, que permitirán la implementación de nuevas tecnologías de tratamiento de residuos plásticos en el AMB.

Establecer visión, alcance y barreras para el cumplimiento de metas respecto a minimizar impactos ambientales de los residuos plásticos relacionados con el COVID-19.

Definición de trayectorias y elementos de acción tecnológica hasta el año 2050, las cuales se establecen en el corto, mediano y largo plazo.

Directrices y recomendaciones del mapa de ruta tecnológico, presentando el mapa de ruta tecnológico de forma estructurada por fases incluyendo hitos para el cumplimiento de metas.

4. Resultados Etapa I

Para realizar el diagnóstico y la recopilación de datos referente a las tecnologías de tratamientos de residuos plásticos en Colombia y en el AMB, se desarrolló un ejercicio de vigilancia tecnológica con las principales etapas representadas en la siguiente figura.

Figura 2.

Etapas de una Vigilancia Tecnológica



Nota: Adaptado de (Arango et al., 2012).

Para evaluar las tecnologías existentes de tratamiento de residuos plásticos a nivel mundial mediante la vigilancia tecnológica se inició con información de patentes, artículos científicos y bases de datos internacionales considerando palabras clave asociadas a las áreas de investigación (Gestión de residuos plásticos, reciclaje, manejo de residuos sólidos, energías renovables).

La búsqueda de artículos científicos fue realizada en la base de datos Scopus (<https://www.scopus.com>), bases de datos nacionales y otras fuentes de información sobre el tratamiento de residuos plásticos en el AMB y Colombia. Se consideraron como elementos principales la búsqueda de tecnologías presentes en un mayor número de publicaciones y que pueden ser empleadas en el área de estudio.

El resultado del ejercicio de vigilancia tecnológica se presenta a continuación.

4.1. Diagnóstico sobre las Tecnologías para la Gestión de Residuos Plásticos.

4.1.1. Residuos Plásticos en Colombia Generados Antes y Después de la Pandemia

A nivel mundial la producción de desechos plásticos equivale al 12% de toda la basura generada (Kaza et al., 2018), cuyo desaprovechamiento llega al 37% del total del material plástico desechado (Advisors et al., 2019). Para el caso de América latina y el Caribe el panorama no deja de ser desalentador puesto que se estima una producción de 17.000 t/día de residuos plásticos para la región (UNEP, 2018).

En Colombia existen cifras igual de alarmantes. En la Tabla 1 se muestran los datos proporcionados por los informes nacionales de disposición de residuos sólidos desde el año 2018 hasta el último informe reportado al año 2021; así como los informes sectoriales de la actividad de aprovechamiento desde el año 2018 al 2020, publicados en septiembre del 2022.

Tabla 1.

Toneladas Anuales de Residuos Sólidos Dispuestos y Aprovechados en Colombia

Año	Disposición final de residuos sólidos (ton/año)	Toneladas anuales aprovechadas	Toneladas aprovechadas de plásticos
2017	10.327.551	529.447	
2018	11.305.133	972.793	97.279,3
2019	11.329.915,34	1.407.785	211.168
2020	11.600.849,21	1.903.269	494.850
2021	11.952.440,90	1.960.201	

Nota. Adaptado de los informes nacionales de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios desde el año 2018 al 2022.

De la tabla anterior se puede observar que, a pesar del comportamiento creciente de la serie entre los años 2017 y 2018 se generó una tasa de aumento mayor en los datos de disposición final de residuos sólidos, reportando un crecimiento de 9.47%, mientras que para el año 2019, 2020 y 2021 el porcentaje de aumento fue de 0.22%, 2.39% y 3.03% respectivamente.

Por otro lado, dentro del reporte de toneladas anuales aprovechadas(residuos que pueden ser reciclados) se observa una disminución en cuanto al porcentaje de crecimiento anual, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 2.

Porcentajes de Variación de Aprovechamiento de Residuos Sólidos

Año	% de variación en toneladas	% de variación de plásticos
	aprovechadas	aprovechados
2017-2018	83,74%	---
2018-2019	44,72	117,07%
2019-2020	35,20	134,34%

Nota. Adaptado de los informes nacionales de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios desde el año 2017 al 2021.

Teniendo en cuenta los datos de la Tabla 2, se observa un incremento para el 2020 en la variación de plásticos aprovechados, ya que se reportó para ese año 494.850 toneladas de plástico y para el año 2019 se reportó un promedio de 211.167 toneladas, lo cual indica que la actual pandemia ha aumentado los desechos plásticos tanto reciclables como los de un solo uso, confirmando los reportes hechos por la UNEP, (2021) donde informa que el uso de plásticos se disparó desde la declaración de emergencia sanitaria por COVID-19 en el 2020, ya que implicó un incremento en el uso de mascarillas, guantes, botellas desinfectantes para manos, trajes médicos

protectores, kits de prueba, recipientes para llevar comida, empaques de entrega y muchos otros productos que se han vuelto indispensables, colapsando los sistemas de reciclaje.

Sin embargo, para el 2020 se obtiene el menor crecimiento de toneladas totales aprovechadas, lo que también podría estar relacionado a la actual pandemia, pues respecto a la gestión de residuos específicamente, una de las principales preocupaciones de orden técnico al inicio de la pandemia consistía en que había un desconocimiento de cómo iba a ser el comportamiento de la emergencia en el país y por tanto cómo iba a afectar esto en la generación de los residuos sólidos con riesgo biológico o infeccioso a razón de la atención de pacientes contagiados por el virus (IDEAM, 2022).

Para comprender mejor la situación, las estimaciones hechas por diferentes entes gubernamentales a nivel latinoamericano sostienen que cada paciente de COVID-19 produce aproximadamente hasta 2 kilogramos de residuos biocontaminados elaborados principalmente con plásticos (Mayorga, 2021) y considerando las características de la enfermedad, cuya duración es un promedio de 14 días (MINAM, 2020), se habrían generado aproximadamente más de 45.200 toneladas de residuos por 1.614.822 personas contagiadas de COVID-19 hasta finales de diciembre de 2020 que reportó el Ministerio de Salud y Protección Social de Colombia.

En virtud de ello se puede deducir que la cantidad de residuos biocontaminados ha incrementado notablemente por las medidas de salubridad adoptadas, como el uso obligatorio de equipos de protección personal (EPP) en áreas comunes y espacios públicos para prevenir el contagio del COVID-19. Pese a que es primordial el cuidado de la salud, se ha dejado en segundo plano el cuidado del medio ambiente y al analizar las estadísticas antes mencionadas, se evidencia notablemente el aumento de la contaminación ambiental en los últimos años; por tanto, es imperioso buscar soluciones a la problemática generada.

En la vigencia del año 2020, se tiene que tanto las toneladas aprovechadas reportadas en el Sistema Único de Información (SUI) como las toneladas dispuestas en rellenos sanitarios siguen presentando un comportamiento creciente independiente entre sí, es decir, actualmente no se evidencia un efecto significativo de la ejecución de la actividad de aprovechamiento en el país en términos de la reducción de la disposición final de los residuos (SSPD, 2022).

4.1.2. Tecnologías de Tratamiento de Residuos Plásticos Existentes

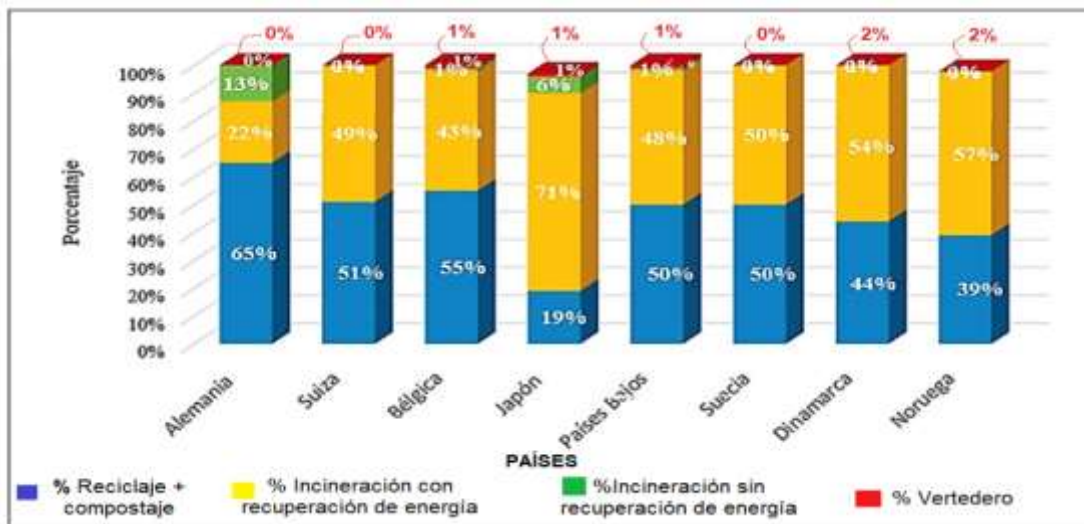
Tecnologías de tratamiento de residuos plásticos en diferentes países del mundo.

Las tecnologías existentes y emergentes para la gestión de residuos plásticos que algunos países adoptaron son los siguientes: el reciclado mecánico y reciclado químico, producción de combustible a través de residuos plásticos, generación de energía a través de incineración de residuos plásticos, la reutilización y los rellenos sanitarios (Segura et al., 2020).

Los países líderes en gestión de residuos sólidos identificados a nivel mundial según Segura et al (2020), descritos en orden de liderazgo son: Alemania, Suiza, Bélgica, Japón, Países Bajos, Suecia, Dinamarca y Noruega. A continuación, se presenta la Figura 3 con la descripción del sistema de gestión de residuos sólidos que opera en los países identificados como los líderes mundiales en términos de recuperación y aprovechamiento.

Figura 3.

Porcentajes de Recuperación y Disposición Final de Residuos Sólidos



Nota. Tomado de Segura et al., 2020.

De acuerdo con la figura anterior, se observa que Japón es el país que tiene el porcentaje más alto en incineración con recuperación de energía y el que ha disminuido más su campo en recuperación con compostaje, además se puede apreciar que países como Alemania, Suiza y Suecia no utilizan la eliminación de desechos en vertederos, lo cual es un impacto positivo para el ambiente.

Con respecto a los sistemas empleados por América Latina y el Caribe (ALC), el informe “perspectiva de la gestión de residuos en América Latina y el Caribe” presentado por la ONU Medio Ambiente en el 2018, asegura que la mayoría de los países latinoamericanos se caracterizan por sus bajos niveles de recuperación y tratamiento, reportando que en la mayoría de los países la práctica más usual para la disposición final de basuras sigue siendo los rellenos sanitarios.

En términos de tasas de recuperación de materiales para ALC, el informe proporciona tasas de reciclaje nacionales promedio para los 11 países representados en la región (Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Colombia, Trinidad y Tobago, Costa Rica, Cuba, México, Perú y Barbados) , siendo

Colombia el país con la tasa más alta de reciclaje, 17%, seguido por Perú y Chile con tasas de reciclaje en torno al 15% y 10%, respectivamente, mientras que los países con las tasas de reciclaje más bajas son Costa Rica y Brasil con valores cercanos al 2% (UNEP, 2018).

5. Resultados Etapa II

5.1 Tecnologías de Tratamiento de Residuos Plásticos en Colombia

El informe nacional de disposición de residuos sólidos del 2022 presentado por la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios– SSPD para el año 2021, señala que Colombia generó 11.952.440,90 toneladas anuales de residuos sólidos y según los datos proporcionados por el informe sectorial de la actividad de aprovechamiento del 2021, se saca un beneficio de un 16.4 % de residuos sólidos, es decir, un total de 1.960.200,308 toneladas, en los cuales se encuentra el plástico con una participación del 25%, un aproximado de 490.050 toneladas anuales.

A pesar de las altas cifras de residuos sólidos generadas en Colombia, no se cuentan con tecnologías adecuadas para su tratamiento y disposición, de modo que, el método más utilizado actualmente son los rellenos sanitarios (SSPD, 2022), el compostaje para residuos orgánicos y la incineración y autoclave para residuos peligrosos en la cual los desechos de cenizas son depositados en rellenos sanitarios, según lo informan empresas del sector.

Entre los datos obtenidos en el informe nacional de residuos peligrosos en Colombia del año 2020 reportados por el IDEAM en el 2022, el país cuenta con 50 empresas con capacidad de gestión de residuos con riesgo biológico, con una capacidad aproximadamente de 12.000 toneladas/mes para realizar el almacenamiento, tratamiento, y/o aprovechamiento; con una distribución por tipo de tecnología como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 3.*Distribución por Tipo de Tecnología de Tratamiento de Residuos Peligrosos*

Proceso	# Establecimientos	Observaciones
Tratamiento Térmico Sin Combustión (TTSC)	16	Incluye autoclave
Almacenamiento (AL)	8	Únicamente realizan almacenamiento
Tratamiento Térmico con Combustión (TTCC)	25	Incineración
TTSC+TTCC	9	Instalaciones que realizan ambos procesos
Total, general	58	

Nota. Datos tomados informe nacional de residuos o desechos peligrosos en Colombia (IDEAM, 2022).

Con base en estos datos cabe resaltar que hasta el momento en Colombia el tratamiento de residuos sólidos por incineración no se está realizando con un aprovechamiento de generación de energía en comparación con países como Japón u otros como se presenta en la Figura 3.

5.2 Nuevas Tecnologías de Tratamiento de Residuos en Colombia

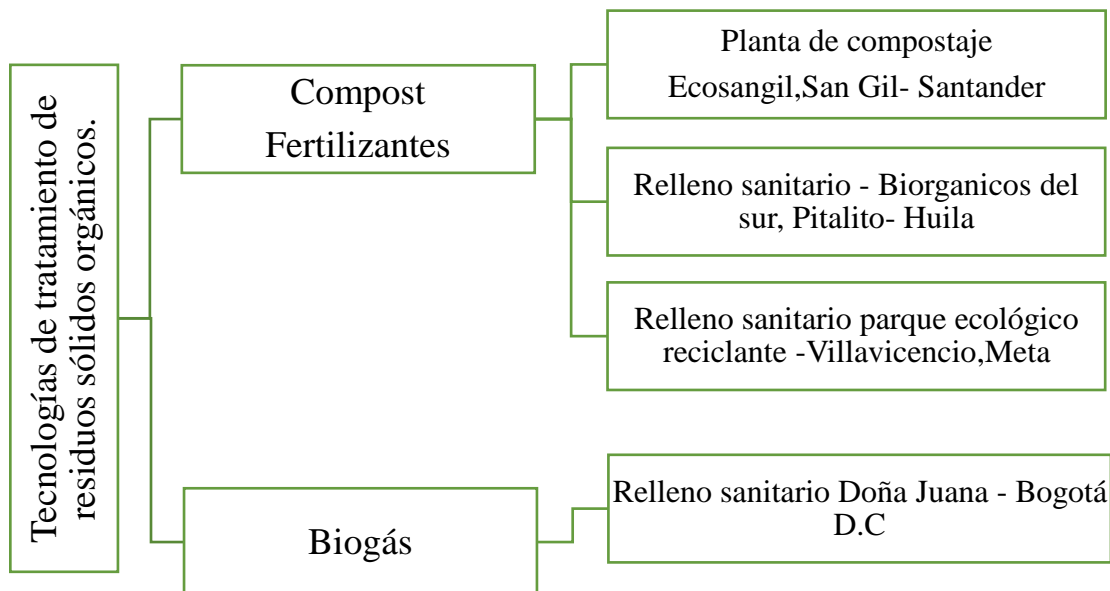
Una alternativa diferente a la disposición final de residuos sólidos —entre ellos residuos plásticos— que se está generando en Colombia se encuentra en el Relleno Sanitario Magic Garden ubicado en San Andrés Isla; el Gobierno nacional a través del Ministerio de Minas y Energía, el Ministerio de Ambiente y la Gobernación de San Andrés promovieron el aprovechamiento de los residuos sólidos para producción de energía a partir de su incineración.

La capacidad receptiva de residuos es de 52,5 ton/día a través de los cuales se espera generar 1,2 megavatios. Esta planta de residuos sólidos con generación de energía es la única en Colombia y aún continua en procesos de pruebas por lo que no ha iniciado operación completa.

A través de la Figura 4 se nombra brevemente los tipos de tecnologías para tratamientos de residuos sólidos inorgánicos en el país con el objetivo de conocer otras alternativas que ha implementado Colombia para minimizar los impactos ambientales y en el Apéndice A se mencionan brevemente algunos aspectos de cada lugar y tratamiento aplicado.

Figura 4.

Tecnologías de Tratamiento de Residuos Sólidos Orgánicos



Nota. Adaptado del informe de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2022.

5.3. Área Metropolitana de Bucaramanga

El Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB) está ubicada sobre el Valle del Río de Oro, con una extensión de 1.479 kilómetros cuadrados. Está conformada por los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta, pertenecientes a la Provincia de Soto, los cuales se encuentran inscritos en la cuenca alta del río Lebrija (Defensoría del pueblo, 2003).

La disposición final de residuos sólidos de las ciudades que conforman el AMB se realiza en el lugar denominado “El Carrasco”, ubicado en el kilómetro 6 vía Girón. “El Carrasco”, es el relleno sanitario del AMB y se remonta a 1978, cuando se estableció como botadero a cielo abierto, desde entonces ha sido utilizado como sitio para disponer los residuos sólidos que se generan en la región, causando problemas de tipo ambiental, social y jurídico. Desde sus inicios este sitio ha tenido diferentes inconvenientes de tipo técnico y legislativo, pues no ha cumplido con las obligaciones requeridas por las autoridades ambientales competentes, convirtiéndolo de acuerdo

con el Sistema Único de Información (SUI) en uno de los puntos de disposición más críticos del país. Debe anotarse que “El Carrasco” ya cumplió su ciclo de vida y a pesar de ello sigue funcionando aún bajo la declaratoria de una emergencia sanitaria (Franco Antolinez et al., 2018).

5.3.1. Tecnologías de Tratamiento de Residuos Plásticos Empleados Actualmente en el AMB.

En el AMB además del sistema de disposición final en relleno sanitario, se utilizan otras opciones como el aprovechamiento/valorización mediante procesos de reciclaje para el manejo de residuos plásticos (SSPD, 2022).

Ahora bien, por motivos de emergencia sanitaria por coronavirus COVID-19 el Ministerio de Salud y Protección Social, por medio de la resolución 385 del 12 de marzo de 2020, realiza un análisis específico de residuos relacionados con la atención en salud, la cual presenta un gran porcentaje de plásticos, donde se establece que la disposición final de los residuos se debe realizar a través de tratamiento térmico con combustión (incineración) o autoclave (IDEAM, 2022).

La termo-destrucción controlada es conocida como incineración, y constituye una forma de tratamiento final de los residuos sólidos que consiste en reducirlos a cenizas inodoras, no combustibles, homogéneas y de mejor aspecto. Por otro lado, el tratamiento térmico con autoclave es un proceso donde se utiliza altas temperaturas con determinados tiempos de residencia para la eliminación de microorganismos patógenos. (Lopez et al., 2010).

5.3.2. Residuos Plásticos Procesados Durante la Pandemia COVID-19 en el AMB.

El último informe nacional de residuos sólidos del 2022, y el informe nacional de aprovechamiento 2021 reporta la cantidad de residuos plásticos generados por los municipios que conforman el AMB (el cual pertenece al 29.72% del total de los RSU) de la siguiente manera:

Figura 5.*Cantidad Estimada de Residuos Plásticos Generados por Año para el AMB*

Nota. Tomado del reporte informe de Superintendencia de Servicios públicos Domiciliarios 2022.

Adicionalmente, se realizó una búsqueda de datos directa de las empresas aprovechadoras de residuos para obtener un comparativo de comportamientos antes y durante la pandemia, de las cuales solo 1 empresa (“Bello Renacer”) de las 38 prestadoras de servicio (Alcaldía de Bucaramanga, 2021), nos aportó datos de la cantidad de residuos plásticos aprovechados en su empresa del 2019 al 2020 para mostrar su comparativo de aprovechamiento antes y durante la pandemia. Asimismo, y en pro de lograr una mejor perspectiva de la contaminación generada por el aumento de residuos a causa de la pandemia, se buscó información de las empresas autorizadas para el tratamiento de residuos peligrosos, ya que los residuos usados por personas contagiadas con el virus y los elementos EPP para la contención del COVID-19 se estaban enviando como residuos contaminados para ser incinerados.

De las 8 empresas adecuadas para gestionar este tipo de residuos también solo 1 (empresa “Descont”) nos proporcionó datos de los plásticos que procesaron antes y durante el comienzo de

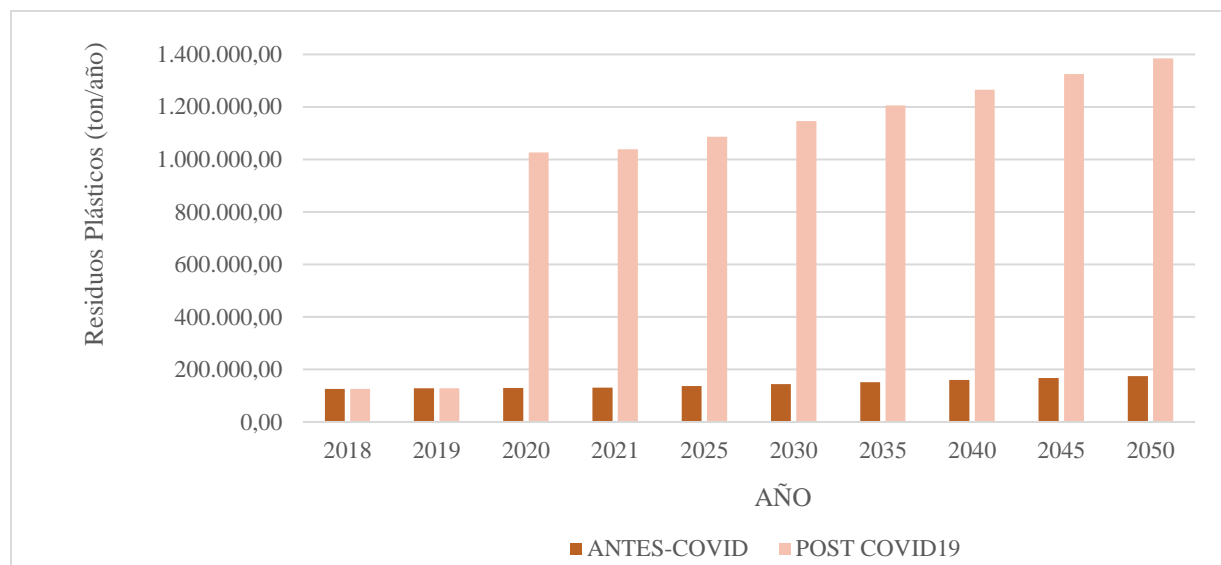
la pandemia, por lo que, debido a la falta de referencias por parte de las instituciones, se decide hacer una proyección de datos producidos después de la pandemia con la información suministrada del informe de la SSPD y con la estimación de producción de 2 kg de residuos plásticos por persona durante la pandemia mencionada anteriormente (MINAM, 2020) . En el Apéndice B se presentan los datos y un pequeño análisis de la información suministrada por las 2 empresas colaboradoras Bello renacer y Descont.

En la Figura 6 se puede observar el escenario antes y después del COVID-19 entre el año 2020 al año 2050, respecto a la generación de residuos plásticos en el AMB.

Para empezar la comparación se realiza primero la proyección de datos antes del virus. Se toman los datos de los residuos plásticos generados en el AMB desde el 2015 al 2020 suministrados por el informe de disposición de residuos sólidos 2022 y se hace una proyección de estos datos (herramienta *curve fitting* de MATLAB R2022b) hasta el año 2050. En la estimación se aproxima un aumento de aproximadamente el 34%, el cual parte del dato actual de 129,567 ton de residuos plásticos del 2020 a una cantidad para el 2050 de aproximadamente 174 mil toneladas. Luego para realizar la proyección de datos del escenario post pandemia se toman los datos de proyección poblacional del AMB (DANE, 2021) y de acuerdo con MINAM, 2020 la generación de residuos aumento para cada personas de a 2 kg, por lo que se multiplica este valor con la población de cada año empezando por el 2020 donde se da inicio a la pandemia hasta el 2050, presentando un aumento aproximado del escenario sin COVID-19 de 174 mil ton a más de 1 millón de ton en el escenario Post pandemia del año 2050. Con base en lo anterior, se hace necesario la creación de un sistema de gestión de desechos responsable y la construcción de un mapa de ruta tecnológico con opciones sostenibles a corto, mediano y largo plazo para el tratamiento de residuos plásticos.

Figura 6.

Proyección de Residuos Plásticos Generados Antes y Después del COVID-19



5. 3.3. Acciones Clave para Mejorar los Procesos Existentes en el AMB

Como la emergencia sanitaria continúa, es muy importante empezar e impulsar estrategias para ayudar a minimizar la generación de residuos y a disminuir el impacto ambiental que los plásticos de un solo uso generan:

- En cuanto al modelo de aprovechamiento y reciclaje que tiene la ciudad, se propone implementar un proceso estricto y comprometido de educación encaminado a la ciudadanía para promover una cultura ambiental que aporte a una adecuada disposición de los residuos plásticos y a la concientización social sobre la importancia de reducir este tipo de residuos (enfaticando los residuos de un solo uso).

- Difundir de manera activa información relevante aprovechando el uso de herramientas digitales y haciendo uso de guías didácticas con el fin de sensibilizar y acentuar el compromiso de las personas involucrando a todos los sectores de la ciudad, comunidad educativa, universidades, empresas, entidades locales y asociaciones (Rondón et al., 2016)

- Buscar por medio de entes gubernamentales la creación de políticas ambientales drásticas que restrinjan como mínimo las bolsas plásticas de un solo uso tanto para empresas como para personas, ayudando a que se desarrollen nuevos patrones de producción y consumo sostenible, promocionando las bolsas reutilizables.

- Gestionar por medio de proyectos e investigaciones que el gobierno brinde medios de financiación a las empresas transformadoras de plástico y botellas PET, para mejorar su tecnología y por ende su proceso, para así poder tener mejores prácticas ambientales. En el Apéndice C se puede observar una información más detallada sobre estas tecnologías.

- Teniendo en cuenta que el relleno sanitario “El Carrasco” ya excedió la capacidad para seguir albergando basura, una acción clave consistiría en la implementación de un sistema de producción de compost y fertilizantes orgánicos que se producen por la descomposición de residuos, así como lo hacen otros rellenos sanitarios del país como el de Villavicencio, Huila o Bogotá, incrementando la vida útil del mismo.

- Establecer un modelo de aprovechamiento energético para el proceso de incineración que se realiza en residuos peligrosos en donde el plástico sea usado como combustible debido a su elevado poder calorífico, haciendo uso de todo tipo de plásticos incluso aquellos que presentan deterioro o suciedad.

6. Resultados Etapa III

6.1. Construcción del Mapa de Ruta Tecnológico

De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía (IEA), un mapa de ruta tecnológico es un plan estratégico que describe los pasos que debe seguir una organización para lograr los resultados y objetivos establecidos, el cual describe claramente los vínculos entre las tareas y las

prioridades de acción a corto, mediano y largo plazo; específicamente “es un conjunto dinámico de requisitos técnicos, políticos, legales, financieros, de mercado y organizativos identificados por todas las partes interesadas involucradas en su desarrollo. El objetivo es acelerar el proceso general de investigación, desarrollo, demostración y despliegue para ofrecer una actualización más temprana de una tecnología energética específica en el mercado”.

Los mapas de ruta tecnológicos han sido ampliamente utilizados en países industrializados donde se llevan a cabo grandes proyectos de Investigación y Desarrollo (I+D) y donde esta planificación estratégica a largo plazo ha ofrecido múltiples beneficios: (a) permite que un territorio se prepare para el futuro de manera ordenada y sistemática, (b) proporciona una base para crear consenso sobre las necesidades y para medir el progreso y el impacto y (c) convierte el consenso y el trabajo analítico en acciones sistemáticas (Amer & Daim, 2010). Por el contrario, la planificación tecnológica rara vez se ha empleado en los países en desarrollo, donde los datos disponibles, la mano de obra calificada y los recursos pueden ser limitados (Gonzalez-Salazar et al., 2016).

Un mapa de ruta tecnológico se desarrolla en 4 fases: 1. Planeamiento y preparación, 2. Visión, 3. Desarrollo del mapa de ruta y 4. Implementación, monitoreo y revisión. Estas fases incluyen dos tipos de actividades: evaluación de expertos y consenso (para ayudar a tomar decisiones importantes sobre las tecnologías y políticas) y la búsqueda de datos y análisis (el juicio de los expertos debe estar respaldado por datos y análisis sólidos para establecer las condiciones de referencia actuales). Las fases del mapa de ruta incluyen cinco componentes esenciales para su desarrollo, representados en la siguiente figura:

Figura 7.

Elementos Clave de un Mapa de Ruta Tecnológico



Nota: Adaptado de (IEA, 2014)

El mapa de ruta final describe un conjunto de prioridades (proyectos de investigación, demostraciones de tecnología, avances en políticas, cambios normativos y compromisos financieros) que se necesitan durante un período de tiempo definido para lograr los objetivos a corto, mediano y largo plazo. La primera etapa de implementación es comenzar esas actividades.

6.2 Método Propuesto

Se propone el método de mapa de ruta tecnológico estructurado por la Agencia Internacional de Energía 2014, que consta, de una actividad (Recopilación de datos y análisis) y cuatro fases (planificación y preparación, visión, desarrollo e implementación y revisión del mapa de ruta), pero en una versión simplificada.

6.3 Aplicación y Alcance del Método al Área Metropolitana de Bucaramanga.

Motivación: De acuerdo con la investigación realizada para los dos primeros objetivos de este proyecto, en Colombia y especialmente el AMB, no se presentan avances significativos en tecnologías para el tratamiento y/o eliminación de desechos plásticos puesto que el reciclaje y la utilización de rellenos sanitarios siguen siendo la únicas opciones para tratar este tipo de residuos.

El cambio repentino en la composición y cantidad de desechos resalta la necesidad de crear un sistema de gestión de desechos responsable y construir un mapa de ruta que conduzca a cambios grandes y persistentes.

Alcance El método propuesto se aplica para crear un mapa de ruta tecnológico para minimizar los impactos ambientales generados por los residuos plásticos relacionados con el COVID-19, caso de estudio: Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB) del 2023 al año 2050. El establecimiento del alcance de este mapa de ruta se basa en el compromiso que Colombia realizó frente a la Cumbre sobre la acción climática ONU de ser un país carbono neutral y un país que reduzca la huella individual y general de gases de efecto invernadero (ONU, 2019) para el año 2050.

6.4 Análisis de Tecnologías y Escenarios Futuros.

En la etapa anterior con la Figura 6 se presentó una predicción de la generación de residuos plásticos para el AMB en dos escenarios *a) Escenario con COVID-19* y *b) Escenario sin COVID-19*, con el cual se deja ver la alarmante situación que se está produciendo a causa de la pandemia.

En busca de soluciones se presenta un análisis para escoger tecnologías de tratamiento de residuos que mitiguen los impactos ambientales analizando: investigación y estudios de cada tecnología, la generación de energía que cada tecnología puedan brindar, las emisiones de CO₂

frente a la energía producida y el costo de producción con el fin de segmentar correctamente las actividades del mapa de ruta tecnológico.

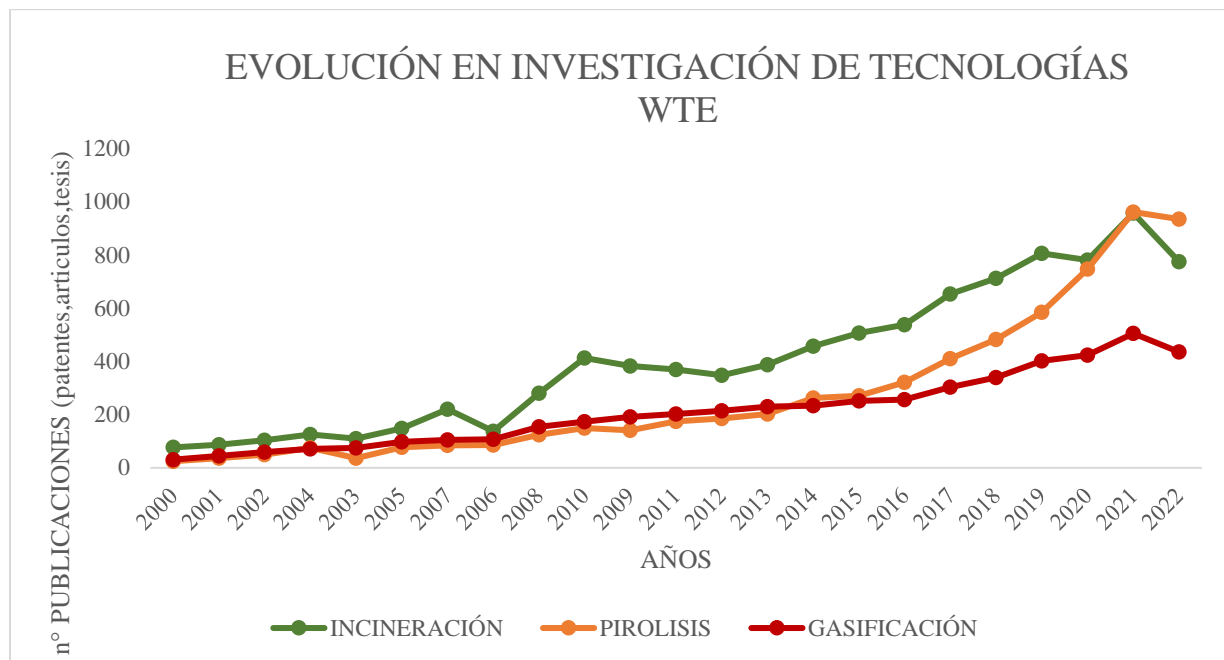
Selección de tecnologías de tratamiento de residuos plásticos para el AMB

El proceso de toma de decisiones sobre la implementación de nuevas tecnologías para el tratamiento de residuos plásticos se realizó por medio de una vigilancia tecnológica basándose en el fundamento de la valorización térmica y los conceptos de Waste to Energy (WtE). Como resultado del análisis de tecnologías WtE y los resultados de la plataforma Scopus se refleja que la mayor cantidad de estudios se basan en las tecnologías de incineración con producción de energía, pirólisis y gasificación.

En la Figura 8 podemos ver la evolución que ha tenido cada una de estas 3 tecnologías en investigación (patentes, artículos científicos, tesis), observando que la incineración es la tecnología que lleva más desarrollo y aplicación. La pirólisis y la gasificación llevaban un comportamiento similar hasta el 2014, luego del 2015 la pirólisis presenta un aumento sobrepasando los estudios en incineración, finalmente queda gasificación con una tendencia de rápido crecimiento para los próximos años.

Figura 8.

Evolución en Investigación de las Tecnologías WtE



Incineración: El proceso de combustión con recuperación de energía conocido como basura a energía (WTE, por sus siglas en inglés), es una de las alternativas existentes para el manejo de la basura, ya que reduce la cantidad de materiales enviados a los rellenos sanitarios, previene la contaminación de agua y aire, permite mejorar los programas de reciclamiento, requiere menos espacio y disminuye la dependencia de los combustibles fósiles para la generación de energía (Arvizu, 2011).

Pirólisis: es una técnica de reciclaje en la que se da la descomposición térmica de los polímeros en ausencia de oxígeno o con una cantidad limitada del mismo, normalmente a temperaturas entre 300 y 900 °C (Miandad et al., 2016). Dependiendo de la temperatura a la cual se dé la pirólisis y otras condiciones de operación del proceso (como presión, flujos o carga de materia prima, velocidad de calentamiento, tiempo de exposición, etc.), pueden obtenerse mezclas de productos sólidos, líquidos y/o gaseosos en diferente proporción y con diferente composición.

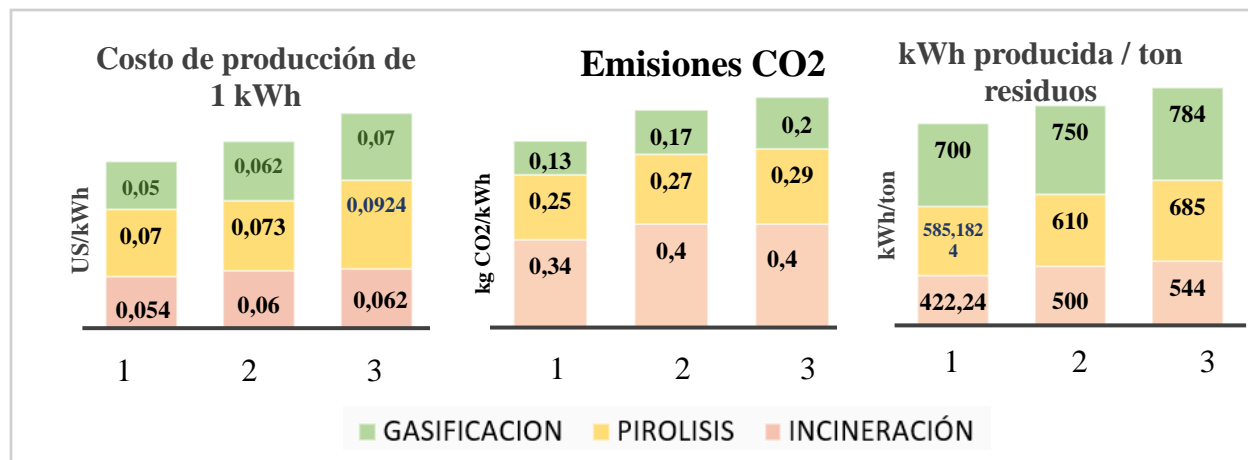
Las diferentes posibilidades de operación de un reactor de pirólisis, así como la gran variedad de plásticos (y sus diferentes composiciones), dan lugar a una elevada combinación de subproductos que pueden tener diversas aplicaciones (Amar Gil et al., 2022).

Gasificación: La tecnología de la gasificación a baja temperatura (500 °C), convierte la basura a una mezcla de gases, con un poder calorífico comprendido entre 6 y 12 MJ/m³. Existen más de 100 plantas de gasificación alrededor del mundo en operación y construcción actualmente, algunas han estado en operación comercial por más de cinco años. La gasificación tiene varias ventajas sobre la incineración convencional, ya que se lleva a cabo en ambientes con bajo contenido de oxígeno, lo que limita la formación de dioxinas y grandes cantidades de óxidos de azufre y nitrógeno. Como resultado de estos requerimientos, el volumen de los gases de combustión producidos es menor, por lo que se requieren equipos de tratamiento más pequeños y menos costosos (Arvizu, 2011).

Para tener un mejor criterio en la selección de que tecnología implementar primero para el AMB, se realiza un comparativo de tres referencias diferentes de estudios a nivel mundial para cada tecnología y enfoque en particular (costo de producción de kWh, emisiones de CO₂ y cantidad de energía producida por 1 ton de plásticos), representadas en la siguiente figura.

Figura 9.

Comparativo de Cada Tecnología en Producción de kWh, CO₂ y US/kWh



Nota: En el Apéndice D se encuentran las tablas con cada una de las referencias y el país donde se realizó el estudio.

Para el costo de 1 kWh se fija en base a dólares donde la incineración sale en un costo promedio de 0,06 US/kWh, la pirólisis con un valor promedio 0.073 US/kWh y la gasificación en un costo aproximado de 0,062 US/kWh.

En cuanto a las emisiones de CO₂, estas se miden en kg CO₂*equivalente y se basan en cuanta emisión produce con un kWh de energía producida por tecnología. La gasificación tiene las menores emisiones con un valor aproximado de 0.17 kg CO₂*eq, seguida de la pirólisis con aproximadamente 0.27 kg CO₂*eq y la incineración con valores entre 0,34 y 0.4 kg CO₂*eq.

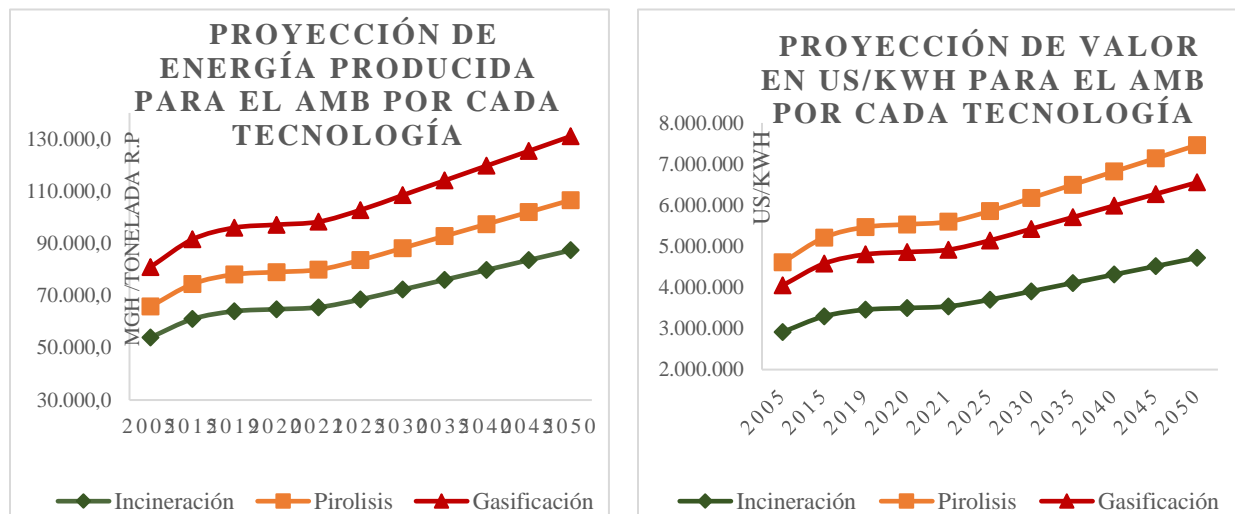
Finalmente, el total de energía generada por cada tonelada de residuos plásticos según los diferentes estudios a nivel internacional (Arena et al., 2011), (Chiemchaisri et al., 2010), (Salisu et al., 2021), ubican a la gasificación como la mayor productora de energía con valores entre 700 y 784 kWh/ton, seguida de pirólisis con valores entre 585 y 685 kWh/ton y la incineración sería la menor productora de energía con valores entre 422 y 544 kWh/ton.

Proyección de emisión de CO₂, generación de kWh y costo de producción de la incineración, pirólisis y gasificación para el AMB

Como ya se tiene datos científicos a nivel internacional, ahora vamos a proyectar los datos analizados de cada tecnología para el AMB, para observar qué tecnología produciría más energía por tonelada de residuos plásticos y el comportamiento frente al costo por kWh. (se realiza el análisis con los datos de proyección realizados en la etapa II de 2005 al 2050 con la generación de residuos antes de la pandemia. Este nos indicará la variación en las tecnologías. Para este caso no se realiza la proyección después del COVID 19 ya que solo aumentaría el rango de las gráficas por aumento de residuos, pero la correlación entre tecnologías será la misma)

Figura 10.

Proyecciones de Aplicación de las 3 Tecnologías en el AMB



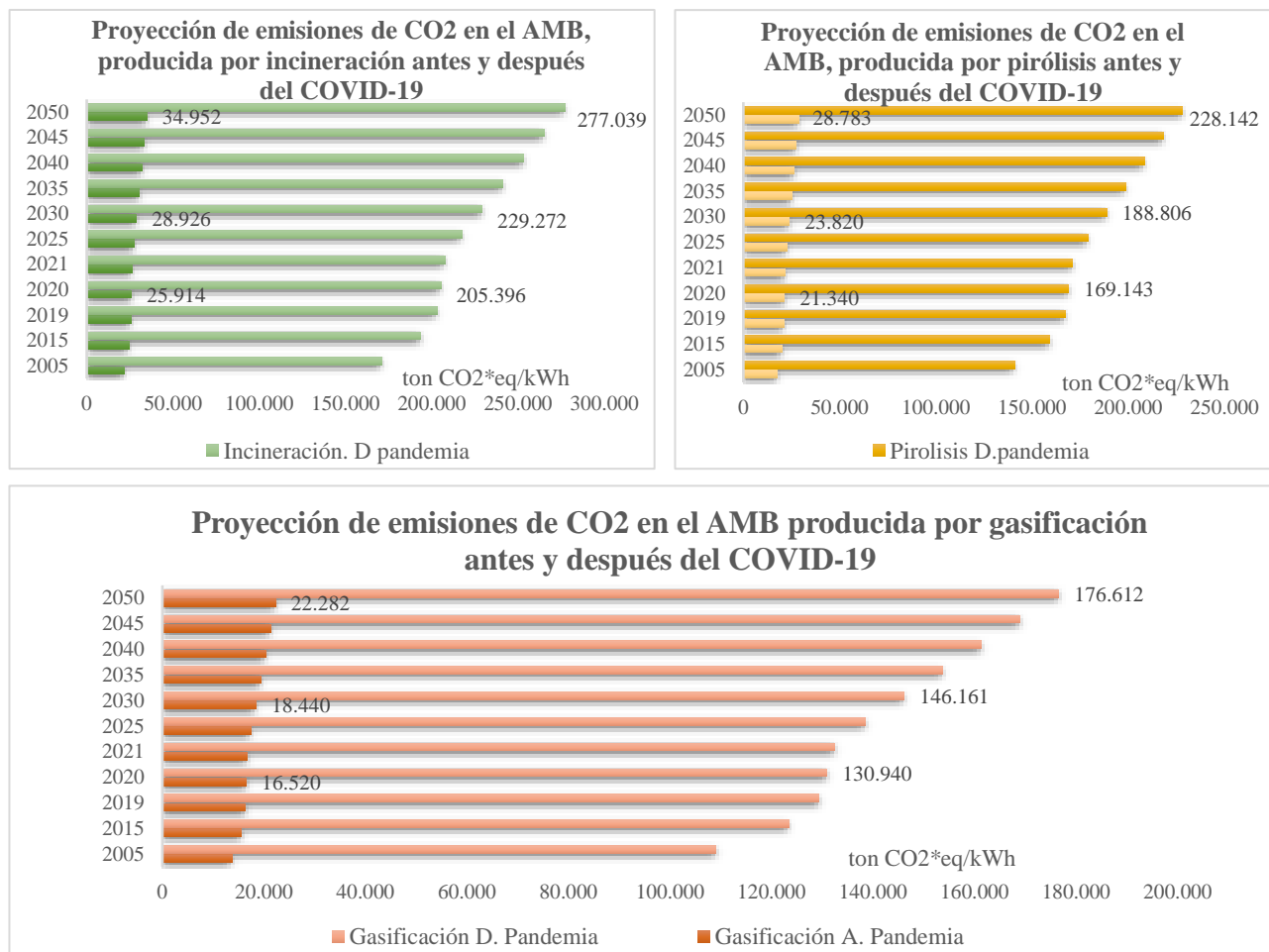
De acuerdo con la Figura 10 la gasificación sería la tecnología que más produciría energía en el AMB seguida por la pirólisis y luego la incineración, llegando a valores al 2050 de 131, 106 y 87 MGh/ton de residuos plásticos.

Como el objetivo principal del mapa de ruta es minimizar los impactos ambientales, se realiza una proyección de las emisiones de CO₂ para cada tecnología antes y después de la

pandemia para cada tecnología, para observar el gran impacto que ha desatado la generación de residuos plásticos a raíz de la pandemia.

Figura 11.

Proyección de Emisiones de CO₂ para el AMB Antes y Post COVID-19



Se puede evidenciar que la tecnología que menos emite CO₂ es la gasificación, la pirólisis es la segunda, aunque se encuentra con rangos similares a la incineración.

6.5 Visión, Objetivos y Barreras

Para el año 2050, el Área Metropolitana de Bucaramanga presentaría una disminución significativa de impactos ambientales, mediante mejoras en los procesos de recuperación,

reciclaje, aplicación de tecnologías de tratamiento y disposición de residuos plásticos, durante y después de la pandemia COVID-19.

Se define un conjunto detallado de objetivos a largo plazo, hitos, tecnologías, políticas y barreras para la visión basada en el análisis anterior de las tecnologías

Objetivos a largo plazo del mapa de ruta tecnológico.

Los objetivos a largo plazo reflejan un interés en minimizar los impactos ambientales en el AMB y reducir las emisiones de carbono.

1. Identificar y priorizar tecnologías clave para el desarrollo futuro.
2. Identificar desafíos y barreras clave de la industria desde aspectos técnicos y comerciales.
3. Formular planes de acción y estrategias para acelerar el crecimiento de la industria y el rápido despliegue de tecnologías.

Barreras

- Altos costos de inversión, operación y mantenimiento.
- Bajo interés de parte del sector privado y entes gubernamentales en ciencia y tecnología.
- Cese de actividades laborales durante la operación.
- Planeación inadecuada en cuanto al diseño de las nuevas tecnologías poniendo en riesgo su correcta construcción y operación.
- Dificultades en etapa de separación de residuos plásticos, ya que una clasificación inadecuada dificulta la eficiencia de los procesos de incineración, pirólisis y gasificación.

6.6 Hitos, Elementos de Acción y Plazos

Conforme a lo anterior se propone para el AMB implementar inicialmente la incineración con generación de energía ya que estudios previos (Zhao et al., 2022) indicaron claramente que

con esta tecnología se puede obtener beneficios en términos de reducción de carbono al evitar la producción de energía en la sociedad y las correspondientes emisiones de carbono en comparación con el vertido en rellenos sanitario, además esta se encuentra más desarrollada y tiene plantas a nivel industrial hace años en otros países y se puede implementar a corto tiempo ya que se puede modificar las incineradoras que actualmente existen para residuos peligrosos lo que implicaría menos costo para su instalación, además su valor de kWh se encuentra entre 0,54 – 0.62 kWh, un valor similar al precio que tiene Colombia actualmente para la energía que es de 0.59 kWh (ENEL, 2021).

La tecnología de pirólisis y gasificación aún se encuentran en estudios e investigaciones de plantas piloto, actualmente hay pocas plantas a nivel mundial comparadas con las de incineración por lo que se proponen para acciones a mediano y largo plazo mientras siguen avanzando sus estudios y las políticas para implementarlas adecuadamente, ya que estas nuevas tecnologías sobre todo la gasificación muestra una emisión menor que las otras dos, con mayor producción de energía por toneladas de residuos.

En la Figura 12 se presenta un diagrama representativo del mapa de ruta, resaltando hitos y elementos de acción resumidos que se necesitan para superar las barreras existentes. Están representadas en tres periodos de tiempo: corto plazo (2023-2025), medio plazo (2026-2035) y las actividades a largo plazo (2035-2050). “En el Apéndice E, se realiza una descripción detallada de cada trayectoria con sus respectivos hitos y elementos de acción.

Figura 12.

Establecimiento de Acciones para el Mapa de Ruta Tecnológico



7. Conclusiones

De acuerdo con la información presentada y analizada, se realizó un diagnóstico que permite concluir que existen países como Alemania, Suiza y Suecia con tecnologías capaces de reducir a cero la disposición de residuos plásticos en rellenos sanitarios, haciendo uso de tecnologías como: reciclaje, incineración con y sin recuperación de energía y otras en menor proporción como pirólisis y gasificación.

En Colombia el único modelo de gestión de residuos plásticos se basa en el reciclaje, lo que deja al descubierto el desinterés por los impactos negativos que este tipo de residuos puede generar a nivel ambiental. Además, se evidenció, de acuerdo con los informes nacionales, un aumento en los residuos plásticos, pasando de 211.167 ton producidas en 2019 a 494.850 ton en 2020; parte de ellos atribuidos a la pandemia del virus COVID-19 debido al uso excesivo de plásticos de un solo uso para evitar la propagación de la pandemia y proteger a la población en general.

En cuanto al tratamiento de residuos plásticos, el AMB cuenta con procesos de reciclaje/aprovechamiento, tratamiento térmico (incineración o autoclave) para residuos peligrosos y disposición en el relleno sanitario “El Carrasco”, en el cual el 29.72% del total de RSU pertenece a residuos plásticos.

De acuerdo con la proyección que se realizó en este estudio en cuanto a generación de residuos plásticos en el AMB, para el año 2050 se generarían 180 mil toneladas de residuos plásticos en un escenario sin pandemia COVID-19 y, en un escenario con pandemia COVID-19 este valor llegaría a más de 1 millón de toneladas de residuos plásticos, representando un aumento de aproximadamente 7 veces la producción de residuos plásticos actuales.

Por lo expuesto se proponen diferentes acciones con el fin de mejorar la gestión de los residuos, entre las que se encuentran: implementar procesos de educación en cultura ambiental a la ciudadanía, buscar la creación de políticas ambientales que incluyan impuestos verdes cambiando los patrones de producción y consumo, incentivar la financiación de proyectos e investigaciones ambientales por parte del gobierno y realizar un estudio para implementar la producción de compost y fertilizantes orgánicos que se generan por la descomposición de residuos en el relleno sanitario.

Se propone la incineración con recuperación de energía como primer proceso de implementación al año 2025, basados en su alto desarrollo industrial a nivel mundial, avances en investigación científica y menor costo de generación de energía, con un valor promedio de 0.06 US/kWh frente a 0.062 y 0.07 US/kWh producidos por las tecnologías de gasificación y pirólisis respectivamente.

La implementación de pirólisis y gasificación se establecen como acciones a mediano y largo plazo, mientras se realizan más estudios científicos, técnicos y económicos, junto con la creación de nuevas políticas regulatorias y ambientales en el país para su adecuado funcionamiento.

Basados en la proyección de residuos plásticos después del COVID-19 y en la trayectoria a largo plazo para un sistema de energía verde, la gasificación sería la tecnología que generaría menores emisiones de CO₂ para el año 2050 con valores de 176.612 ton CO₂*eq frente a 228.142 y 277.039 ton CO₂*eq procedentes de pirólisis e incineración respectivamente.

8. Recomendaciones

Debido a la baja accesibilidad de datos sobre la recolección de desechos plásticos en el AMB, se recomienda crear una base de datos que proporcione un acceso preciso y fácil a la información sobre la gestión de residuos municipales en el AMB a través de la participación de organismos de control gubernamentales.

Es recomendable que el mapa de ruta propuesto se actualice periódicamente para adecuarse a los cambios en el contexto tecnológico, regulatorio, económico, social y ambiental, tanto a nivel regional, nacional e internacional.

El mapa de ruta desarrollado podría adaptarse a otras ciudades de América Latina, promoviendo la utilización y correcta disposición de los residuos plásticos como una fuente alternativa para la producción de energía sostenible y minimización de impactos ambientales.

Referencias Bibliográficas

- Advisors, D., de Wit, W., Hamilton, A., Scheer, R., Stakes, T., & Allan, S. (2019). Solving plastic pollution through accountability. *WWF—World Wide Fund For Nature, Gland, Switzerland*.
- Alcaldía de Bucaramanga. (2021). *Actualización plan de gestión integral de residuos sólidos PGIRS 2016 -2027*.
- Allam, Z., & Jones, D. (2018). Towards a Circular Economy: A Case Study of Waste Conversion into Housing Units in Cotonou, Benin. *Urban Science*, 2(4), 118. <https://doi.org/10.3390/urbansci2040118>
- Amar Gil, S., Ardila Arias, A. N., & Barrera Zapata, R. (2022). Simulación y obtención de combustibles sintéticos a partir de la pirólisis de residuos plásticos. *Ingeniería y Desarrollo*, 37(02), 306–326. <https://doi.org/10.14482/inde.37.2.1285>
- Amer, M., & Daim, T. U. (2010). Application of technology roadmaps for renewable energy sector. *Technological Forecasting and Social Change*, 77(8), 1355–1370. <https://doi.org/10.1016/J.TECHFORE.2010.05.002>
- Arango, B., Tamayo, L., & Fadul, A. (2012). Vigilancia tecnológica: metodologías y aplicaciones. *Revista Electrónica Gestión de las Personas y Tecnología*, 5(13). <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=477847114019>
- Arena, U., di Gregorio, F., Amorese, C., & Mastellone, M. L. (2011). A techno-economic comparison of fluidized bed gasification of two mixed plastic wastes. *Waste Management*, 31(7), 1494–1504. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.02.004>
- Arvizu, J. L. (2011). La basura como recurso energético. Situación actual y prospectiva en México. *Ingeniería Civil*, 496, 36–44.

- Chidepatil, A., Bindra, P., Kulkarni, D., Qazi, M., Kshirsagar, M., & Sankaran, K. (2020). From Trash to Cash: How Blockchain and Multi-Sensor-Driven Artificial Intelligence Can Transform Circular Economy of Plastic Waste? *Administrative Sciences*, *10*(2), 23. <https://doi.org/10.3390/admsci10020023>
- Chiemchaisri, C., Charannok, B., & Visvanathan, C. (2010). Recovery of plastic wastes from dumpsite as refuse-derived fuel and its utilization in small gasification system. *Bioresource Technology*, *101*(5), 1522–1527. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.08.061>
- Cudjoe, D., & Wang, H. (2022). Plasma gasification versus incineration of plastic waste: Energy, economic and environmental analysis. *Fuel Processing Technology*, *237*, 107470. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2022.107470>
- DANE. (2021). *Proyecciones derivadas del Censo Nacional de Población 2018*.
- Defensoría del pueblo. (2003). *Disposición final de los residuos sólidos en el Área Metropolitana de Bucaramanga del departamento de Santander*.
- Demetriou, A., & Crossin, E. (2019). Life cycle assessment of paper and plastic packaging waste in landfill, incineration, and gasification-pyrolysis. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, *21*(4), 850–860. <https://doi.org/10.1007/s10163-019-00842-4>
- Dong, J., Tang, Y., Nzihou, A., & Chi, Y. (2019a). Key factors influencing the environmental performance of pyrolysis, gasification and incineration Waste-to-Energy technologies. *Energy Conversion and Management*, *196*, 497–512. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.06.016>
- Dong, J., Tang, Y., Nzihou, A., & Chi, Y. (2019b). Key factors influencing the environmental performance of pyrolysis, gasification and incineration Waste-to-Energy technologies.

- Energy Conversion and Management*, 196, 497–512.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.06.016>
- ENEL. (2021). *Tarifas de energía*. <https://www.enel.com.co/es/personas/tarifas-energia-enel-distribucion.html>
- Ferronato, N., & Torretta, V. (2019). Waste Mismanagement in Developing Countries: A Review of Global Issues. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(6). <https://doi.org/10.3390/ijerph16061060>
- Fivga, A., & Dimitriou, I. (2018). Pyrolysis of plastic waste for production of heavy fuel substitute: A techno-economic assessment. *Energy*, 149, 865–874.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.094>
- Flores, P. (2020). The issue of plastic use during the Covid-19 pandemic. *South Sustainability*, 1(2), e016. <https://doi.org/10.21142/SS-0102-2020-016>
- Franco Antolinez, L. J., Meza Joya, M. A., & Almeida, J. E. (2018). Situación de la disposición final de residuos sólidos en el Área Metropolitana de Bucaramanga: caso relleno sanitario El Carrasco (revisión). *Avances Investigación En Ingeniería*, 15(1), 180–193.
- Ghodrat, M., & Samali, B. (2018). *Techno-economic Analysis of Energy Recovery from Plastic Waste* (pp. 13–24). https://doi.org/10.1007/978-3-319-72138-5_2
- Gomez, L. M. (2020). El desafío ambiental: enseñanzas a partir de la COVID-19. *MEDISAN [Online]*, 24(4), 728–743. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1029-30192020000400728&lng=es&nrm=iso
- Gonzalez-Salazar, M. A., Venturini, M., Poganietz, W. R., Finkenrath, M., Kirsten, T., Acevedo, H., & Spina, P. R. (2016). Development of a technology roadmap for bioenergy

- exploitation including biofuels, waste-to-energy and power generation & CHP. *Applied Energy*, 180, 338–352. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2016.07.120>
- Gordon, E., & Pineda, R. (2003). *Estudio de viabilidad técnica y económica de una planta de generación de energía eléctrica a partir de la incineración de residuos sólidos urbanos (rsu) en San Andrés Isla*. 22/01/2023 https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1456&context=ing_electrica
- Gradus, R. H. J. M., Nillesen, P. H. L., Dijkgraaf, E., & van Koppen, R. J. (2017). A Cost-effectiveness Analysis for Incineration or Recycling of Dutch Household Plastic Waste. *Ecological Economics*, 135, 22–28. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.12.021>
- Greenpeace. (2020, July 23). "No hay evidencia científica de que los plásticos de un solo uso sean la opción más segura para mitigar el contagio del COVID-19". <https://www.greenpeace.org/colombia/noticia/issues/contaminacion/no-hay-evidencia-cientifica-de-que-los-plasticos-de-un-solo-uso-sean-la-opcion-mas-segura-para-mitigar-el-contagio-del-covid-19/>
- Hasan, M. M., Rasul, M. G., Khan, M. M. K., Ashwath, N., & Jahirul, M. I. (2021). Energy recovery from municipal solid waste using pyrolysis technology: A review on current status and developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 145, 111073. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111073>
- IDEAM. (2022). *Informe nacional de generación y manejo de residuos o desechos peligrosos en Colombia*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales

- IEA. (2014). *Energy Technology Roadmaps a guide to development and implementation*.
<https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-a-guide-to-development-and-implementation>
- Jaromir Klemes, J., & van Fan, Y. (2020). Plastic Replacements: Win or Loss? 2020 5th *International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)*, 1–6.
<https://doi.org/10.23919/SpliTech49282.2020.9243775>
- Kaza, S., Yao, L. C., Bhada-Tata, P., & van Woerden, F. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*.
- Klemeš, J. J., Fan, Y. van, Tan, R. R., & Jiang, P. (2020). Minimising the present and future plastic waste, energy and environmental footprints related to COVID-19. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 127, 109883. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2020.109883>
- Kulas, D. G., Zolghadr, A., Chaudhari, U. S., & Shonnard, D. R. (2023). Economic and environmental analysis of plastics pyrolysis after secondary sortation of mixed plastic waste. *Journal of Cleaner Production*, 384, 135542.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135542>
- Kulkarni, S. v., & Shastri, Y. (2020). Economic Analysis and Life Cycle Assessment of Pyrolysis of Plastic Waste in Mumbai, India. In *Sustainable Waste Management: Policies and Case Studies* (pp. 453–463). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-7071-7_40
- Kumar, A., & Samadder, S. R. (2017). A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste. *Waste Management*, 69, 407–422.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.046>

- Lam, S. S., Wan Mahari, W. A., Ok, Y. S., Peng, W., Chong, C. T., Ma, N. L., Chase, H. A., Liew, Z., Yusup, S., Kwon, E. E., & Tsang, D. C. W. (2019). Microwave vacuum pyrolysis of waste plastic and used cooking oil for simultaneous waste reduction and sustainable energy conversion: Recovery of cleaner liquid fuel and techno-economic analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *115*, 109359. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109359>
- Lopez, J., Martínez, E., & Rey, G. (2010). *Manual de Gestión Integral de Residuos*.
- Marta, A., Loureiro, V., Borschiver, S., Luiz, P., & Coutinho, A. (2010). The Technology Roadmapping Method and its Usage in Chemistry. In *J. Technol. Manag. Innov* (Vol. 5, Issue 3). <http://www.jotmi.org>
- Mayorga, J. (2021, March 30). La nueva ola de la contaminación plástica. *Proceso*. <https://www.proquest.com/newspapers/la-nueva-ola-de-contaminación-plástica/docview/2507490983/se-2?accountid=29068>
- Meys, R., Frick, F., Westhues, S., Sternberg, A., Klankermayer, J., & Bardow, A. (2020). Towards a circular economy for plastic packaging wastes – the environmental potential of chemical recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, *162*, 105010. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105010>
- Miandad, R., Barakat, M. A., Aburizaiza, A. S., Rehan, M., & Nizami, A. S. (2016). Catalytic pyrolysis of plastic waste: A review. *Process Safety and Environmental Protection*, *102*, 822–838. <https://doi.org/10.1016/J.PSEP.2016.06.022>
- MINAM. (2020). *Servicio de recolección, transporte externo, tratamiento y disposición final de residuos sólidos biocontaminados generados por las personas diagnosticadas con COVID-19, en distritos de Lima y Callao*.

http://www.digesa.minsa.gob.pe/Orientacion/GESTION_INTEGRAL_MANEJO_DE_RSS-%20COVID-19.pdf

- Nabavi-Pelesaraei, A., Bayat, R., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Afrasyabi, H., & Chau, K. (2017). Modeling of energy consumption and environmental life cycle assessment for incineration and landfill systems of municipal solid waste management - A case study in Tehran Metropolis of Iran. *Journal of Cleaner Production*, 148, 427–440. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.172>
- ONU. (2019). *Carbon Neutrality 2050 the world most urgent mission*. <https://www.un.org/es/climatechange/2019-climate-action-summit>
- Panepinto, D., Tedesco, V., Brizio, E., & Genon, G. (2015). Environmental Performances and Energy Efficiency for MSW Gasification Treatment. *Waste and Biomass Valorization*, 6(1), 123–135. <https://doi.org/10.1007/s12649-014-9322-7>
- Phaal, R., Farrukh, C. J. P., & Probert, D. R. (2001). Characterisation of technology roadmaps: purpose and format. *PICMET '01. Portland International Conference on Management of Engineering and Technology. Proceedings Vol.1: Book of Summaries (IEEE Cat. No.01CH37199)*, 367–374. <https://doi.org/10.1109/PICMET.2001.952036>
- Rondón, E., Szantó, M., Pacheco, J., Contreras, E., & Gálvez, A. (2016). *Guía general para la gestión de residuos sólidos domiciliarios*.
- Rutala, W. A., & Weber, D. J. (2015). Disinfection, Sterilization, and Control of Hospital Waste. In *Mandell, Douglas, and Bennett's Principles and Practice of Infectious Diseases* (pp. 3294-3309.e4). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4557-4801-3.00301-5>

- Saadat, S., Rawtani, D., & Hussain, C. M. (2020). Environmental perspective of COVID-19. *Science of The Total Environment*, 728, 138870. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.138870>
- Salisu, J., Gao, N., & Quan, C. (2021). Techno-economic Assessment of Co-gasification of Rice Husk and Plastic Waste as an Off-grid Power Source for Small Scale Rice Milling - an Aspen Plus Model. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 158, 105157. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105157>
- Sánchez Ascanio, L., Torres Correa, K. A., & Quintero-Coronel, D. A. (2022). Thermo-economic analysis of the potential for electricity generation by integrating a Rankine cycle with municipal solid waste incineration. *Journal of Physics: Conference Series*, 2163(1), 012007. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2163/1/012007>
- Segura, Á., Rojas, L., & Pulido, Y. (2020). Referentes mundiales en sistemas de gestión de residuos sólidos. *Revista Espacios*, 41(17), 1–9.
- Sharma, H. B., Vanapalli, K. R., Cheela, V. S., Ranjan, V. P., Jaglan, A. K., Dubey, B., Goel, S., & Bhattacharya, J. (2020). Challenges, opportunities, and innovations for effective solid waste management during and post COVID-19 pandemic. *Resources, Conservation and Recycling*, 162, 105052. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2020.105052>
- Singh, R. P., Tyagi, V. v., Allen, T., Ibrahim, M. H., & Kothari, R. (2011). An overview for exploring the possibilities of energy generation from municipal solid waste (MSW) in Indian scenario. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 4797–4808. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2011.07.071>
- SSPD. (2022). *Informe nacional de disposición final de residuos sólidos 2021*.

- Tang, W. (2020). *The medical waste related to COVID-2019 is cleaned up every day—the medical waste treatment market needs to be standardised*. www.21jingji.com/2020/3-12/xNMDEzODFfMTU0MjIxNQ.html
- UAESP. (2021). *Modelo de aprovechamiento, La basura no es basura*.
- UNEP. (2018). Waste Management Outlook for Latin America and the Caribbean. In *United Nations Environment Programme*. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/26448>
- UNEP. (2020, December 16). *Waste management an essential public service in the fight to beat COVID-19*. <https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/waste-management-essential-public-service-fight-beat-covid-19>
- UNEP. (2021). *From Pollution to Solution: A global assessment on marine litter and plastic pollution*. <https://www.unep.org/resources/pollution-solution-global-assessment-marine-litter-and-plastic-pollution>
- Vanapalli, K. R., Sharma, H. B., Ranjan, V. P., Samal, B., Bhattacharya, J., Dubey, B. K., & Goel, S. (2021). Challenges and strategies for effective plastic waste management during and post COVID-19 pandemic. *Science of The Total Environment*, 750, 141514. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.141514>
- Voss, R., Lee, R. P., Seidl, L., Keller, F., & Fröhling, M. (2021). Global warming potential and economic performance of gasification-based chemical recycling and incineration pathways for residual municipal solid waste treatment in Germany. *Waste Management*, 134, 206–219. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.07.040>
- Zhao, Y., Yuan, J., Zhao, S., Chang, H., Li, R., Lin, G., & Li, X. (2022). Is pyrolysis technology an advisable choice for municipal solid waste treatment from a low carbon perspective? *Chemical Engineering Journal*, 449, 137785. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.137785>

Zheng, Y.-Y., Ma, Y.-T., Zhang, J.-Y., & Xie, X. (2020). COVID-19 and the cardiovascular system. *Nature Reviews Cardiology*, *17*(5), 259–260. <https://doi.org/10.1038/s41569-020-0360-5>

Apéndices

Apéndice A. *Tratamientos Actuales para Residuos Sólidos en Colombia.*

Relleno sanitario BIORGÁNICOS DEL SUR, Pitalito-Huila.

Según el último informe nacional de residuos sólidos presentado en el año 2022, este relleno sanitario se distingue por aprovechar los residuos orgánicos, donde seleccionan la materia orgánica y la llevan a una molienda donde se generan fertilizantes. El compost obtenido se utiliza como acondicionador de suelo. Un porcentaje se comercializa con los agricultores y ganaderos del sector y otro se complementa con una adición de minerales para su respectiva venta.

Tabla 4.

Residuos sólidos totales y porcentaje de aprovechamiento en ton

AÑO	Residuos sólidos totales	Residuos sólidos aprovechados	Residuos sólidos dispuestos	Porcentaje de aprovechamiento
2016	26.269	10.813	15.456	59%
2017	30.417	12.842	17.575	58%
2018	31.400	14.712	16.688	53%

Nota. Datos tomados del informe de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2022.

Planta de compostaje ECOSANGIL, San Gil -Santander.

La planta de compostaje Ecosangil, también aprovecha los residuos orgánicos ingresados en la planta, generando en promedio 57,94 toneladas al mes de compost, según la información entregada por el informe de residuos sólidos del 2022 se generaron 1.166 toneladas para ese año y

1.681 toneladas para el 2021. El producto final es vendido como abono a diferentes clientes, de acuerdo con el prestador.

Relleno Sanitario “Parque Ecológico Reciclante” – Villavicencio, Meta

El relleno sanitario “Parque Ecológico Reciclante” de Villavicencio lo menciona el informe nacional de residuos sólidos - 2022, como una de las nuevas tecnologías de tratamiento que empezó en 2019 la técnica de compostaje, donde buscan la reincorporación de los residuos sólidos orgánicos resultantes de la prestación del servicio de aseo dentro de la cadena de valor.

De acuerdo con cifras del prestador, aproximadamente son tratadas 70 toneladas por mes de residuos orgánicos no procesados, provenientes directamente de la Central de Abastos de la ciudad, equivalentes al 0,5 % de los residuos generados en el Área de Prestación del Servicio – APS. Igualmente, se incorpora al proceso una cantidad aproximada de 14 ton/mes de residuos vegetales provenientes del componente de Poda de árboles, equivalente al 0,1% de los residuos generados en el APS.

Relleno Sanitario Doña Juana. Bogotá D.C

El modelo de aprovechamiento del 2022 presentado por la alcaldía mayor de Bogotá presenta una de las tecnologías de tratamiento de residuos orgánicos más relevante en la ciudad relacionada con una planta de tratamiento y aprovechamiento de biogás a partir de la descomposición de los residuos sólidos urbanos que llegan al relleno sanitario “Doña Juana”.

Esta planta contribuye a mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero -GEI, mediante la destrucción térmica del (CH₄) y la reducción de emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y el aprovechamiento mediante la generación de energía, por lo que la planta generadora de energía eléctrica no se considera una fuente generadora de GEI, debido a que el biogás previo a su transformación para la generación de energía eléctrica llega en condiciones adecuadas para

ingresar a los moto generadores y su posterior transformación en energía. Es importante aclarar que el biogás captado es generado en el relleno sanitario como producto de la descomposición biológica de la materia orgánica que contienen los residuos sólidos que llegan a las celdas de disposición final. Por lo tanto, en esta planta no se procesan desechos dados que los gases son captados por extracción activa mediante una red de captación de chimeneas que permite el transporte de este a la planta de biogás.

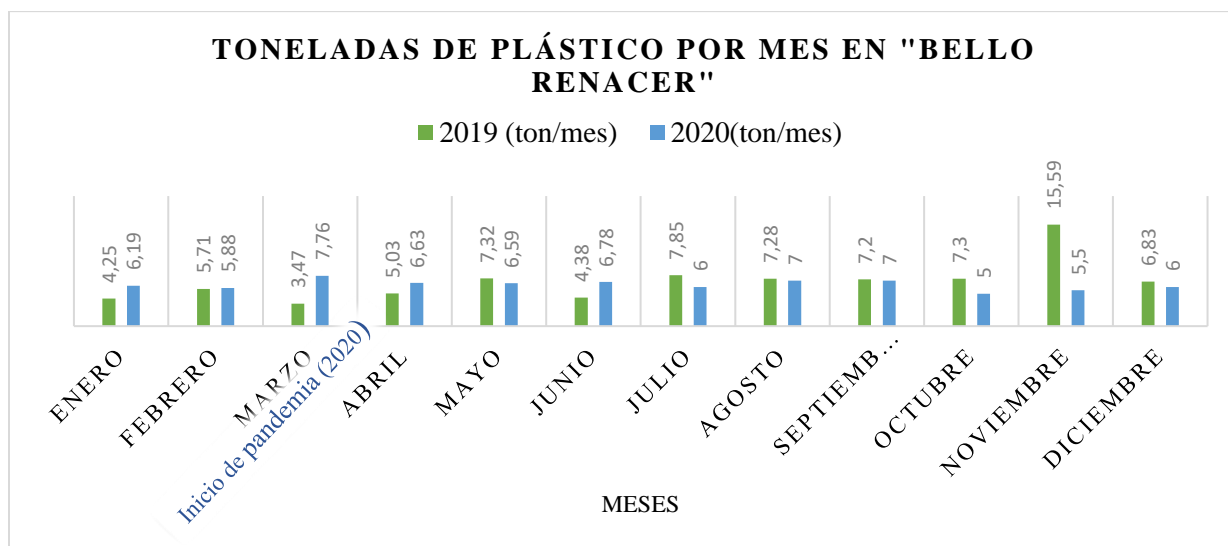
Actualmente, la capacidad de generación de energía está en 1,7 megavatios, energía suficiente para la demanda de cuatro mil hogares en Bogotá. Sin embargo, la visión de la planta para el 2023 es aumentar la capacidad hasta 25 megavatios por hora, lo que generaría el recurso eléctrico para más de 60 mil hogares (UAESP, 2021).

Apéndice B. Residuos Plásticos Gestionados por las Empresas Bello Renacer y Descont

La empresa aprovechadora de residuos plásticos llamada “Bello Renacer” ubicada en el kilómetro 4 vía Bucaramanga- Girón suministro los datos representados en la Figura 13 relacionados con la cantidad de residuos plásticos aprovechados en su empresa del 2019 al 2020.

Figura 13.

Toneladas de Plástico aprovechados 2019-2020



Nota. Adaptado de los datos suministrados por la Cooperativa de Recicladores Bello Renacer, 2020.

A la luz de los datos suministrados por la empresa “Bello Renacer” se puede observar que después de marzo —mes en que el ministerio de salud y protección social declararon la emergencia sanitaria en Colombia—, las toneladas aprovechadas en la mayoría de los meses fueron disminuyendo. Una de las razones que influyen en el desaprovechamiento de residuos plásticos, es la crisis generada por el COVID-19 que desembocó en el aumento del consumo de plásticos de un solo uso (como bolsas, icopor, pitillos, empaques de alimentos preparados de consumo inmediato) y elementos de protección personal como tapabocas, guantes, mascarillas, etc

(Greenpeace, 2020), lo que implicó una inadecuada disposición de este tipo de desechos y consecuentemente una reducción en su aprovechamiento.

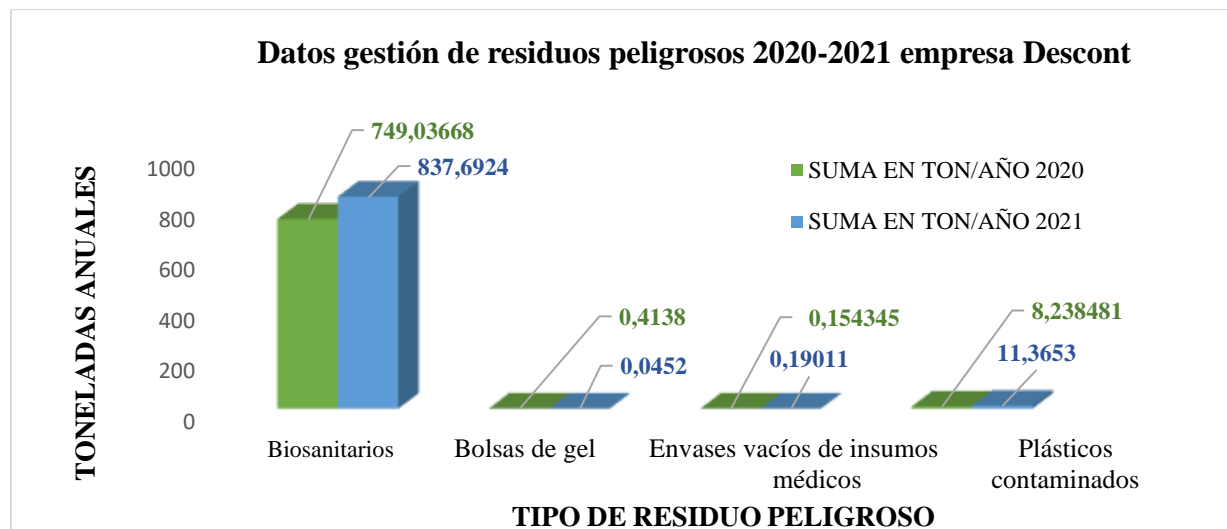
Por otro lado, se observa que los datos de noviembre de 2019 son irregulares, mostrando un incremento en los residuos plásticos aprovechados que se podría atribuir a aspectos como: errores de digitación en la cantidad de plásticos recibidos en la empresa “Bello Renacer” o que realmente la empresa recibió en ese mes el doble de plásticos que venía aprovechando (teniendo en cuenta que este dato no fue aclarado puntualmente por la empresa).

Como ya se mencionó anteriormente, el año 2020 fue inusual para el país debido a la pandemia, por lo que se expidieron normas y lineamientos específicos con relación al manejo de los residuos de riesgo biológico que se generan en la atención de salud en hogares e instituciones Prestadoras de Salud. Dentro de la clasificación de residuos biológicos están los biosanitarios, se encuentran aquellos elementos e instrumentos que tengan contacto con fluidos corporales de alto riesgo, tales como: gasas, apósitos, aplicadores, algodones, drenes, vendajes, mechas, guantes, bolsas para transfusiones sanguíneas, catéteres, sondas, sistemas cerrados y abiertos de drenajes, medios de cultivo o cualquier otro elemento desechable que la tecnología médica introduzca o que los pacientes contaminados utilicen (IDEAM, 2022).

Una de las empresas autorizadas para el tratamiento de residuos peligrosos en el Área Metropolitana de Bucaramanga es “Descont SAS”, la cual suministró información del año 2020 y 2021 , acerca del tipo y la cantidad de residuos plásticos que reciben, aplicando tratamientos de autoclave e incineración.

Figura 14.

Datos de gestión de residuos peligrosos en la empresa Descont



Nota. Adaptado de los datos suministrados por la empresa Descont S.A.S.E.S.P, 2020-2021.

En la Figura 14 se destaca el aumento de residuos peligrosos como: biosanitarios, envases vacíos de insumos médicos y plásticos contaminados del año 2020 al 2021, corroborando lo mencionado anteriormente sobre el crecimiento del consumo de plástico a causa del COVID-19.

Aunque se buscaron datos del año 2019 para realizar un análisis más detallado al comparar el aumento de plásticos desde el año en que no había empezado el COVID-19 con respecto a los años de la pandemia, fue limitada la recopilación de datos en esa empresa e inaccesible los datos de otras empresas para realizar un mejor estudio en el AMB.

Apéndice C. Tecnologías para Mejorar el Sistema de Reciclaje

Las nuevas tecnologías que se están aplicando en otros países para mejorar el sistema de reciclaje y que ayudarían a minimizar los impactos ambientales en el Área Metropolitana de Bucaramanga, van desde un sistema de sensores múltiples para clasificar adecuadamente el tipo de plásticos hasta la conversión de estos residuos en unidades de vivienda.

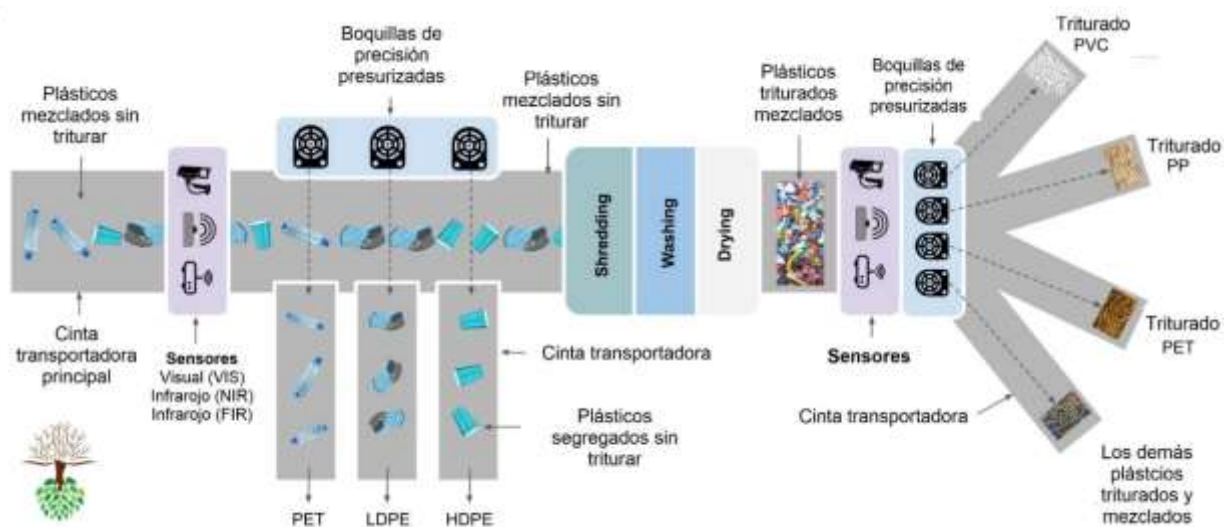
De acuerdo con las investigaciones hechas por Chidepatil et al (2020), de Finlandia, uno de los principales problemas en la gestión de residuos plásticos se encuentra en la falta de técnicas de separación adecuadas, ya que el manejo inadecuado de este tipo de residuos disminuye las posibilidades de una buena transformación del material, la utilización de otras tecnologías como la pirólisis o gasificación sobre estos desechos y la disminución en la compra de materias primas de plástico reciclado, debido a que los fabricantes prefieren productos vírgenes a causa de la falta de información sobre la calidad, idoneidad y disponibilidad de los plásticos reciclados.

Las herramienta desarrollada por Chidepatil et al (2020), para ayudar a la clasificación adecuada de residuos plásticos es la utilización de inteligencia artificial empleando diferentes tipos de sensores como los ópticos, obteniendo datos sobre forma, color y textura, permitiendo una separación de botellas u objetos de plástico de determinadas formas o colores. También emplean diodos láser o infrarrojos cercanos (NIR) e infrarrojos lejanos (FIR), los cuales estudian las frecuencias de resonancia de diferentes plásticos que permiten diferenciar entre seis tipos de plásticos detectables tales como: PET (tereftalato de polietileno), PE (polietileno), PVC (cloruro de polivinilo), PP (polipropileno), PS (poliestireno) y ABS (acrilonitrilo butadieno estireno), además de proporcionar información sobre sus composiciones físicas y químicas (Figura 15).

Además de la mejora tecnológica de Chidepatil, bindra et al., 2020, implementaron una plataforma “blockchain”, la cual complementa la técnica de separación de residuos mencionada anteriormente, proporcionando información sobre la idoneidad, el cumplimiento de la calidad, el precio de oferta y la disponibilidad de materia prima de plástico reciclado, compartiendo los datos de manera confiable entre segregadores, recicladores y fabricantes.

Figura 15.

Segregación de desechos plásticos mezclados en categorías respectivas utilizando datos de sensores múltiple



Nota: Tomado de (Chidepatil et al., 2020).

Esencialmente, estos sensores diferencian diferentes grados de plástico en función de la frecuencia de resonancia de cada tipo de plástico. Aquellas frecuencias en las que el espectro de absorción del plástico tiene un pico, se denominan frecuencias resonantes. Diferentes moléculas de plástico tienen diferentes frecuencias de resonancia. Al escanear los desechos plásticos con estos detectores láser en un rango de frecuencias, podemos encontrar su frecuencia de resonancia. Dependiendo de su frecuencia de resonancia, podemos identificar el tipo de plástico.

Por otro lado, la investigación de (Allam & Jones, 2018) en Cotonou- Benín, plantean que a través de la adecuada clasificación de los residuos plásticos como se mencionó anteriormente, se puedan garantizar materias primas de calidad para crear ladrillos de plástico sostenibles utilizando betún como aglutinante.

Los ladrillos de plástico reconstituidos consisten en un 70 % de plástico, brindan más resistencia a la compresión que la piedra de laterita (suelo duro con textura nodular muy rico en hierro y óxidos de aluminio, muy similar a la bauxita en cuanto su textura y composición química) e implican una absorción de agua mucho menor que la piedra. Además, desde un punto de vista económico estimaron que el costo de la recolección de residuos plásticos para su transformación en ladrillos es de US \$ 25 por m³, y que el uso de estos ladrillos para construir viviendas es un 48% más económico que el uso de ladrillos de piedra laterita.

Estos ladrillos a base de plástico de mayor rendimiento, ofrecen una solución sostenible para la eliminación de desechos plásticos y una alternativa viable económicamente para viviendas de bajo costo, por lo que este tipo de proyectos así como en Cotonou – Benín, en el Área Metropolitana de Bucaramanga también permitirían resolver la crisis de vivienda en las familias más vulnerables y abordar el problema de los residuos plásticos, reduciendo la cantidad de productos de desecho que se liberan al medio ambiente, al tiempo que aumenta la reutilización y generación de ingresos en todos los sectores.

Apéndice D. Referencias Mundiales para Comparativo de Eficiencia de las Tecnologías.

Tabla 5.

Parámetros de costo y emisiones de CO₂ para pirólisis

PARÁMETROS DE COSTO Y EMISIONES DE CO ₂ PARA PIRÓLISIS			
COSTO US/kwh	PAÍS	Kg CO ₂ eq	REFERENCIA
0.0924	Malasia	-----	(Lam et al., 2019)
0.073	EE. UU.-Michigan	0.27	(Kulas et al., 2023)
0.070	Inglaterra	-----	(Fivga & Dimitriou, 2018)
-----	Alemania	0.25	(Dong et al., 2019a)
-----	Europa	0.29-0.3	(Meys et al., 2020)

Tabla 6.

Parámetros de costo y emisiones de CO₂ para gasificación

PARÁMETROS DE COSTO Y EMISIONES DE CO ₂ PARA GASIFICACIÓN			
COSTO US/kWh	PAÍS	Kg CO ₂ eq	REFERENCIA
0.230	China	0.2	(Cudjoe & Wang, 2022)
0.07-0.11	Nigeria	-----	(Salisu et al., 2021)
0.05	Tailandia	-----	(Chiemchaisri et al., 2010)
0.062	Italia	-----	(Arena et al., 2011)
0.090	Alemania	0.17	(Voss et al., 2021)
-----	Finlandia	0.13	(Dong et al., 2019b)

Tabla 7.

Parámetros de costo y emisiones de CO₂ para incineración

PARÁMETROS DE COSTO Y EMISIONES DE CO ₂ PARA INCINERACIÓN			
COSTO US/kWh	PAÍS	Kg CO ₂ eq	REFERENCIA
----	China	0.4	(Cudjoe & Wang, 2022)
0.054	Holanda	----	(Gradus et al., 2017)
0.05	Australia	----	(Ghodrat & Samali, 2018)
0,062	Colombia-Ocaña	----	(Sánchez Ascanio et al., 2022)
0.06	San Andrés -Colombia	----	(Gordon & Pineda, 2003)
----	Francia	0.34	(Dong et al., 2019a)
----	Alemania	0.4	(Voss et al., 2021)

Tabla 8.

Parámetros de relación kWh / tonelada de residuos plásticos

PARÁMETROS DE RELACIÓN kWh/ TONELADA DE RESIDUOS PLÁSTICOS			
TECNOLOGÍA	TIPO DE RESIDUOS	KWH/ton	REFERENCIA, ENLACE
	China	500–600	(Hasan et al., 2021)
	Irán	422.24	(Nabavi-Pelesaraei et al., 2017)
INCINERACIÓN	Países en desarrollo y desarrollados	544	(Kumar & Samadder, 2017)
	Mumbai, India	585,1824	(Kulkarni & Shastri, 2020)
	Australia	610	(Demetrious & Crossin, 2019)

PARÁMETROS DE RELACIÓN kWh/ TONELADA DE RESIDUOS PLÁSTICOS			
TECNOLOGÍA	TIPO DE RESIDUOS	KWH/ton	REFERENCIA, ENLACE
PIRÓLISIS	Países en desarrollo	685	(Kumar & Samadder, 2017)
	Noruega	750	
GASIFICACIÓN	Japón	784	(Panepinto et al., 2015)
	Bélgica	700	

Apéndice E. Descripción Detallada para las Acciones de la Trayectoria 1, 2 y 3

Figura 16.

Descripción detallada para las acciones de la trayectoria 1 (2023 a 2025)

Trayectorias	Trayectoria 1 : 2023 - 2025		
Años	2023	2024	2025
Entidades gubernamentales AMB	<ul style="list-style-type: none"> Investigación para mejorar la clasificación, el reciclaje y la reutilización de los residuos plásticos. Financiación para mejorar los procesos y tecnologías de tratamiento de residuos existentes. Programas educativos para concienciar sobre la gestión de los residuos plásticos. Establecer impuestos ecológicos para la gestión de los residuos plásticos. Prohibición del plástico de un solo uso para empresas y particulares. Incentivos económicos para promover el reciclaje. 		
INDUSTRIA	<ul style="list-style-type: none"> Generación de energía mediante tecnologías de incineración de residuos plásticos y recuperación de energía. Diseño, desarrollo y caracterización de sistemas automatizados de separación de desechos a escala industrial. Sustitución gradual de materiales de productos de un solo uso. Mejora del diseño y la fabricación de métodos de tratamiento de residuos plásticos de menor coste. Proporcionar herramientas para transformar los sistemas existentes de eliminación final de residuos sólidos. 	<ul style="list-style-type: none"> Demstrar la viabilidad económica de los plásticos reciclados 	
ACADEMIA	<ul style="list-style-type: none"> Creación de una nueva red institucional de grupos de investigación eliminación final de residuos en el AMB. Desarrollo de acciones pedagógicas para la educación en la gestión del residuos plásticos. Investigación sobre tecnologías para la generación de energía a partir de residuos plásticos 	<ul style="list-style-type: none"> Simulaciones sobre la producción de energía para estimar la viabilidad de los tratamientos térmicos. Evaluación y estimación de la eficiencia tecnológica y la viabilidad económica. 	

miro

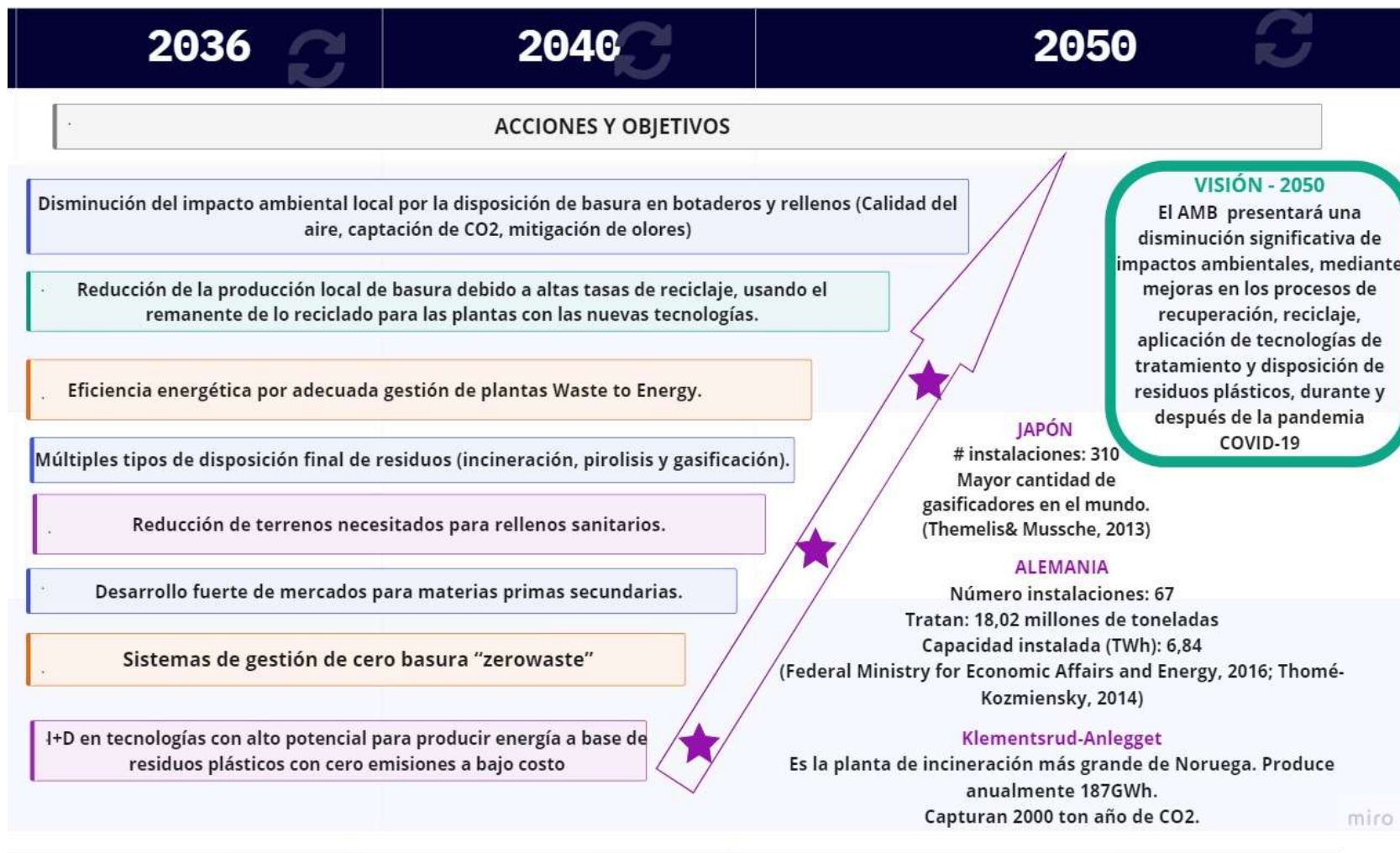
Figura 17.

Descripción detallada para las acciones de la trayectoria 2 (años 2026-2035)

Trayectorias	TRAYECTORIA 2 : 2026-2035		
AÑOS	2026	2030	2035
ENTIDADES GUBERNAMENTALES AMB	<ul style="list-style-type: none"> Brindar recursos económicos para el mantenimiento de las plantas de aprovechamiento energético de residuos. -Crear marcos regulatorios, y políticos para el funcionamiento de las plantas de aprovechamiento energético. Promover la eliminación del sistema tradicional de disposición final de residuos. Incentivos a la compra y venta de energía renovable producida por este tipo de plantas. Incentivar la I&D –declarando las tecnologías de generación de energía con residuos como prioridad nacional. 		
INDUSTRIA	<ul style="list-style-type: none"> Establecer un cronograma para la implementación de las nuevas tecnologías tales como gasificación y pirólisis ◆ Analizar la disponibilidad de la combustión autotérmica para incineración y pirólisis. ◆ El poder calorífico es uno de los indicadores para decidir si los RSU son adecuados para el proceso. Los valores caloríficos superiores a 8 MJ/kg indican que todas las tecnologías de combustión son opciones ideales para los proyectos de conversión de residuos en energía (GIZ,2017). ★ Empresas como Gen2Power, Green Waste Energy y la irlandesa Glanpower han encargado a TSK el diseño y puesta en marcha de una planta de pirólisis de residuos en Irlanda, que procesará 75.000 toneladas de residuos al año (TSK, 2021). Control de la contaminación para las tecnologías de conversión de residuos en energía ★ Implementar la tecnología de pirólisis de residuos plásticos para el año 2030 ★ Analizar la aplicación de gasificación para el año 2035. ★ La empresa Elche Greene Waste to Energy ubicada en España, ofrece al mercado una tecnología eficiente, que responde a la necesidad de gestionar y eliminar residuos en diferentes entornos como los (RSU) o los residuos industriales, logrando la generación de energía (eléctrica y térmica) , a través de un proceso de gasificación sin emisiones (Greene, 2021). 		
ACADEMIA	<ul style="list-style-type: none"> Formación profesional , para funcionarios municipales y entidades gubernamentales basadas en las nuevas plantas. Estudios de replicabilidad de tecnologías renovables basadas en residuos plásticos a nivel nacional. Campañas sociales y de sensibilización basadas en nuevos proyectos para la comunidad. Cursos de aplicación de las tecnologías para ingenieros, profesionales y operarios. 		

Figura 18.

Descripción detallada para las acciones y objetivos de la trayectoria 3 (años 2036-2050)



Apéndice F. Productos de Investigación

Durante el desarrollo de este trabajo han surgido algunos productos de investigación que podrían ser la base para futuros estudios. Entre esos se encuentran dos conferencias internacionales y la publicación de un artículo científico.

En el presente anexo se presentarán los productos de investigación resultado del desarrollo de este trabajo.

- Artículo científico: “Chemical Engineering Transactions”. Sandra P. Peña, Viatcheslav V. Kafarov, Andrés L. Esteban, Lynda Carreño. “Technology Roadmap for Plastic Waste Utilization Based on Sustainability Criteria. Case Study: Medium Sized Municipality in Latin America During COVID-19 Pandemic”. <https://doi.org/10.3303/CET2294082>.

- Conferencia WasteEng22: Sandra P. Peña, Viatcheslav V. Kafarov, Andrés L. Esteban, Lynda Carreño, Juan P. Afanador, Ivón L. Bonilla. Se participó en la “9th International Conference on Engineering for Waste and Biomass Valorisation - WasteEng22” con presentación oral titulado “– Development of technology roadmap for valorisation of plastic waste related to covid-19, based on technology surveillance, life cycle assessment and estimation of economic viability. Case study Bucaramanga, Colombia”.

- Conferencia PRES22: Sandra P. Peña, Viatcheslav V. Kafarov, Andrés L. Esteban, Lynda Carreño. Se participa en la “25th Conference on Process Integration for Energy Saving and Pollution Reduction – PRES’22” con el póster titulado “Technology Roadmap for Plastic Waste Utilization Based on Sustainability Criteria. Case Study: Medium Sized Municipality in Latin America During COVID-19 Pandemic”.