

Metodologías Innovadoras para el Aprovechamiento de Residuos en Colombia

Elaborado por:

Shirley Muñoz Rodríguez

Ivonne Vanessa Peña Montaña

Valentina Zamora Leal

Universidad EAN

Escuela de Formación en Investigación

Seminario de Investigación de Pregrado

Especialización en Gerencia de Proyectos

Bogotá

06/06/23

Tabla de contenido

RESUMEN	5
1. GENERALIDADES	6
1.1. Problema de investigación	6
1.2. Antecedentes del problema	6
1.2.1. Descripción del problema.....	7
1.3. Pregunta de Investigación	8
1.4. Objetivos	9
1.4.1. Objetivo General	9
1.4.2. Objetivos Específicos.....	9
1.5. Justificación.....	10
2. MARCO TEÓRICO	11
3. METODOLOGÍA.....	16
3.1. Primer nivel	16
3.1.1. Enfoque, alcance y diseño de la investigación.....	16
3.1.2. Definición de Variables.....	17
3.1.3. Muestra.....	19
3.2. Segundo nivel.....	19
3.2.1. Selección de métodos o instrumentos para recolección de información.....	19
3.2.2. Técnicas de análisis de datos.....	20
3.2.3. Criterios de evaluación.....	24
4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	26
4.1. Metodologías implementadas en Colombia para el aprovechamiento de residuos.....	26
4.2. Descripción de las metodologías de aprovechamiento de residuos implementadas en Colombia	27
4.2.1. Compostaje.....	27
4.2.2. Proceso de digestión anaerobia	29
4.2.3. Plantas de Biogás	30
4.3. Casos de estudio sobre las metodologías de aprovechamiento de residuos implementadas en Colombia	30
4.3.1. Relleno Sanitario Biorgánicos del Sur del Huila	31
4.3.2. Biogás Doña Juana.....	34
4.4. Metodologías innovadoras que se implementan a nivel internacional para el aprovechamiento de residuos.....	36

4.4.1. Termovalorización:	37
4.4.2. Tratamiento Mecánico-Biológico	37
4.4.3. Gasificación por plasma	38
4.5. Casos de estudio metodologías innovadoras	39
4.5.1. Plantas de termovalorización	40
4.5.2. Planta Mecánica-Biológica	43
4.5.3. Planta de Gasificación por Plasma	45
4.6. Barreras y limitaciones para la implementación de metodologías innovadoras en Colombia para el aprovechamiento de residuos.	47
4.7. Selección de las metodologías innovadoras de mejor aplicabilidad para el aprovechamiento de residuos en Colombia, implementando el método de matriz multicriterio..	55
4.7.1. Identificación de los criterios	55
4.7.2. Identificación de alternativas	56
4.7.3. Construcción de la matriz multicriterio.....	56
4.7.4. Análisis y comparación de las alternativas con el resultado de la matriz multicriterio .	59
CONCLUSIONES	61
REFERENCIAS.....	64

Lista de Tablas

Tabla 1. Variables de la Investigación	17
Tabla 2. Técnicas de Análisis de Datos para la Investigación.....	20
Tabla 3. Estadísticas de Disposición Final de Residuos Sólidos en Colombia para el año 2021 .	26
Tabla 4. Aspectos Descriptivos del caso de estudio Relleno Sanitario Biorgánicos del Sur del Huila, Pitalito, Huila	31
Tabla 5. Aspectos Descriptivos del Caso de Estudio Biogás Doña Juana.....	34
Tabla 6. Aspectos Descriptivos del Caso de Estudio Planta Maresme en Barcelona, España	40
Tabla 7. Aspectos Descriptivos del Caso de Estudio Planta de Shenzhen	42
Tabla 8. Aspectos Descriptivos del Caso de Estudio Planta de tratamiento de residuos de Milá	43
Tabla 9. Aspectos Descriptivos del Caso de Estudio The Westinghouse Plasma Gasification....	45
Tabla 10. Análisis de contenido caso de estudio, Biogás Doña Juana	48
Tabla 11. Análisis de contenido caso de estudio, Biorgánicos del sur del Huila S.A. E.S.P.	49
Tabla 12. Análisis de contenido caso de estudio, Planta Maresme en Barcelona, España.	50
Tabla 13. Análisis de contenido caso de estudio, Planta de Shenzhen	51
Tabla 14. Análisis de contenido caso de estudio, Planta de tratamiento de residuos de Milá (Menorca).....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 16. Matriz Multicriterio para la Selección de las Metodologías Innovadoras de mejor Aplicabilidad para el Aprovechamiento de Residuos en Colombia	58

Lista de Figuras

Figura 1. Procesos de Tratamiento de Residuos	13
Figura 2. Zona de Compostaje en Biorgánicos del Sur del Huila.....	33
Figura 3. Planta de Biogas Doña Juana	36
Figura 4. Descripción del Proceso de Gasificación por Plasma	39
Figura 5. Planta Maresme en Barcelona, España.....	41
Figura 6. Planta de Shenzhen.....	43
Figura 7. Planta de tratamiento de residuos de Milá (Menorca).....	45
Figura 8. Capacidad de aprovechamiento de la planta de gasificación por plasma.....	46
Figura 9. The Westinghouse Plasma Gasification	47

RESUMEN

El presente trabajo de investigación se refiere a identificar y analizar las diferentes metodologías innovadoras y tecnológicas para el aprovechamiento de residuos que hay en el mundo diferentes a las que se aplican en Colombia. En la actualidad, la biodigestión y el compostaje son los procesos que se llevan a cabo para el aprovechamiento de desechos en el País, con este trabajo se busca explicar y analizar el por qué metodologías y procesos innovadores y tecnológicos como la termovalorización no se emplean aún en Colombia, para lo cual se desarrolla un marco teórico basado en 2 fases, la primera fase, se define en residuos donde se incluye los tipos y el aprovechamiento de residuos y la segunda fase, se enfoca en las tecnologías existentes e innovadoras que se encuentran actualmente en el mundo. De acuerdo con lo anterior, se planteó una metodología cualitativa con enfoque inductivo debido a que el proyecto se basa en la investigación flexible y en generar distintas teorías sobre el aprovechamiento de residuos, además, se busca realizar una recolección y análisis de información para comprender y dar respuesta a los objetivos planteados.

Palabras claves: Aprovechamiento de residuos, innovación, tecnología, procesos, rellenos sanitarios, metodologías.

1. GENERALIDADES

1.1. Problema de investigación

En Colombia, actualmente, se genera un alto número de residuos sólidos, pero, en la mayoría de las ocasiones se utilizan los mismos procesos para aprovechar estos residuos (Biodigestión y compostaje), debido a su bajo costo y al conocimiento alcanzado generando una zona de confort en las personas que realizan estos procedimientos. A pesar de que el incremento de residuos sólidos está relacionado con la inflación poblacional, no se han tomado las medidas necesarias para modificar estos procesos y no se cuenta con la tecnología apropiada para realizarlo.

1.2. Antecedentes del problema

"Según el Departamento Nacional de Planeación (DNP) en Colombia se generan 11,6 millones de toneladas de residuos al año, de estos, el 83% termina en rellenos sanitarios y tan solo un 17% se recupera". (DNP, 2015)

Por otro lado, según el DNP en países de la Unión Europea se aprovecha el 67% de los residuos generados (DNP, 2015), de esto se puede concluir que la disposición final, tratamiento y aprovechamiento de residuos en Colombia son procesos que no son llevados a cabo como se debería, lo cual entre otras causas se debe a la falta de tecnología e innovación, adicionalmente en el país no se reglamenta, enseña e incentiva a realizar separación en la fuente y recolección selectiva.

Sumado a esto, hay dos puntos críticos a los que el país se enfrenta, primero la vida útil promedio de los rellenos sanitarios en Colombia se estima es de cinco años (DNP, 2015), segundo se estima que la generación de residuos crecerá un 20% en los próximos 10 años (DNP, 2015), lo cual prevé un riesgo ambiental y de salud pública para el país.

No obstante, Colombia sigue manejando un modelo de economía lineal, una muestra de esto, es que según el informe nacional de disposición de residuos sólidos 2020 (SSPD), en Colombia existen cuatro sistemas de disposición final de residuos: relleno sanitario, celda de contingencia, celda transitoria y botadero a cielo abierto. (SSPD, 2021, 23)

Para el año 2020 en el país se contaba con 174 rellenos sanitarios, 84 botaderos a cielo abierto, 13 celdas de contingencia, 10 celdas transitorias y tan solo dos plantas de tratamiento (SSPD, 2021, p. 23), esto es una evidencia de los retos a los que se enfrenta el país, uno de

eliminar los lugares no autorizados para la disposición de residuos (botaderos a cielo abierto, celdas transitorias) y dos la implementación de tecnologías innovadoras para el aprovechamiento de residuos buscando fomentar la economía circular. (SSPD, 2021, p.23)

Actualmente, el tratamiento de residuos en Colombia esta principalmente enfocado en la producción de compostaje, más que en la valorización energética de los residuos, esto debido a que los residuos inorgánicos, se destinan al reciclaje y para el aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos el compostaje es un método que requiere bajos costos de inversión, esto es un indicio de que el país necesita fomentar el conocimiento y la implementación de tecnologías innovadoras que abran la puerta al aprovechamiento energético de los residuos. (Breukers y Puentes, 2021, p.62).

1.2.1. Descripción del problema.

En la actualidad, se tienen tecnologías como plasma reciclaje, biocombustible, bioalcohol, incineración, compostaje, biometanización, gasificación, biodiesel, sin embargo, en países como Colombia, los métodos mayormente utilizados son el reciclaje y compostaje, al tener dos variables importantes en el desarrollo de éstas, obedecen principalmente por ser económicas y el tiempo para su ejecución es menor en comparación con las demás tecnologías.

Conforme a lo indicado por el Banco Mundial, a través de sus plataformas virtuales, registran que desde el año 2000, “el Banco Mundial se ha responsabilizado por más de USD 4700 millones para más de 340 programas de gestión de los desechos sólidos en todo el mundo” (Banco mundial, 2018, párr. 18).

Explorando sobre I+D enfocado a la mejora del reciclaje, (Fernández, A. 2017), enuncia que desde 2017, países como España, que continuamente avanzan en la innovación y trabajo verde como lo han denominado, destacan ocho proyectos coordinados con Universidades, Instituciones y Ecoembes, éste último, conforme lo indica su página web, “Es una organización sin ánimo de lucro que cuida del medioambiente a través del reciclaje y el ecodiseño de los envases domésticos ligeros en España” (Fernández, A. 2017, párr. 3).

Algunos de los proyectos innovadores que menciona (Fernández, A. 2017), Son” ChatBot, ContenedorGo, SmartWaste, Planta 4.0., Big Data, Envases más sostenibles y reciclables,

Aceleradora de start-ups, Análisis de Ciclo de Vida”, a partir de esta fuente de información, se puede decir que existen diversas metodologías innovadoras para maximizar la transformación de residuos en Colombia.

Es así que, el problema de los residuos sólidos en Colombia se debe a la falta de diversidad de tecnologías implementadas para el aprovechamiento de los mismos. No se tienen metodologías y procesos que determinen una ruta hacia la exploración e implementación de diversas técnicas para la máxima explotación de residuos en el país.

Actualmente en Colombia, la falta de vías de investigación, salidas de ofertas, incentivos financieros (descuentos de renta) empresariales y a personas naturales, enfocados en la búsqueda de alternativas de solución, tecnificación e implementación de nuevas alternativas, encaminados a crear nuevas tecnologías para el manejo de los residuos, hacen que aún se continúe con la misma administración de residuos que opera en la actualidad el País.

Por esta razón, las instancias gubernamentales no logran incentivar y fomentar la búsqueda de nuevas opciones que promuevan el cambio en el uso de recursos que presenta Colombia en comparación con los países desarrollados respecto al aprovechamiento de los residuos sólidos.

Es así como en Colombia falta implementar campañas que pretendan aumentar la cultura e incrementar la educación sobre el aprovechamiento de los residuos sólidos en la población. Existen países como Suiza, que el 75% de sus envases de vidrio, PET y aluminio son reciclados. (Reciclaje, 2021).

1.3. Pregunta de Investigación

¿Si ya existen procesos y metodologías innovadoras para el aprovechamiento de residuos en el mundo por qué en Colombia solo se maneja los rellenos sanitarios?

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Presentar metodologías innovadoras para el aprovechamiento de residuos en Colombia diferentes a la biodigestión y compostaje.

1.4.2. Objetivos Específicos

- 1.** Especificar las metodologías que se utilizan en Colombia para el aprovechamiento de residuos.
- 2.** Identificar metodologías innovadoras que se implementan a nivel internacional para el aprovechamiento de residuos.
- 3.** Explicar los criterios del porque no se utilizan metodologías innovadoras en Colombia para el aprovechamiento de residuos.
- 4.** Analizar las metodologías innovadoras aplicadas en Colombia y en el exterior con la finalidad de verificar las estrategias técnicas y los métodos de mejor aplicabilidad.

1.5. Justificación

En Colombia se disponen 32.580 toneladas/día de residuos sólidos (MADS, 2022), cifra entregada por la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. Por tal motivo, esta investigación sirve para realizar una recopilación y análisis de datos para así, determinar las metodologías innovadoras, tecnológicas y con mayor impacto al medio ambiente que existen en el mundo para poder replicarlas en Colombia y cambiar el manejo de la recolección y disposición de residuos en los rellenos sanitarios. A partir de lo anterior, se busca transformar los procesos de aprovechamiento de residuos para mejorar la calidad de vida de las personas que lo realizan y, además, optimizar tiempo y disminuir el impacto ambiental que genera actualmente el procedimiento y asimismo afecta a todos los colombianos.

Por consiguiente, la alcaldesa de Bogotá Claudia López, ha venido trabajando en un proyecto que refiere a una planta de Termovalorización, en la cual “Se descomponen los residuos inorgánicos a través del calor, en un proceso favorable para el medio ambiente, pues genera bajas emisiones de CO₂ y hace eficiente el manejo de la basura al convertirla en energía” (Rivera, Y. 2022, párr. 1); esto con el fin de disminuir el impacto ambiental y generar energías limpias en la ciudad.

El campo de investigación del proyecto es Ciencia, tecnología e innovación, de acuerdo a esto el grupo en el que se encuentra es Gestión ambiental y la línea de investigación es, metodologías e instrumentos para la gestión ambiental, para finalizar, esta investigación da como resultado un aumento de conocimiento sobre innovaciones y tecnologías que se pueden aplicar en Colombia para el proceso del aprovechamiento de residuos sólidos, y así, beneficiar a la población.

2. MARCO TEÓRICO

Los residuos sólidos representan un material que se desecha después de que ha pasado su vida útil y generalmente no tiene valor económico intrínseco. (Rivas, C. 2021)

De esta forma, en la mayoría de los casos todos los residuos sólidos pueden ser reutilizados o convertidos mediante una técnica adecuada. Los principales 'productores' de residuos sólidos son los ciudadanos de las grandes ciudades, de los cuales una proporción muy elevada se debe en gran parte a su desconocimiento en los procesos de tratamiento y la separación en la fuente. (Rivas, C. 2021)

Adicionalmente, los residuos sólidos se clasifican y los criterios mayormente utilizados son: según la peligrosidad, el origen y su composición. (Rivas, C. 2021)

Por consiguiente, en Colombia, se tienen 266 sitios de disposición final de los residuos sólidos, de los cuales el 42,85%, tiene una vida útil menor a 10 años; y el 18% de éste, su vida útil es menor a 3 años, donde el 6,8% ya se encuentra vencida. (DNP, 2015)

Colombia cuenta con varios tipos de sistemas para la disposición final de residuos sólidos, categorizados por Superservicios en sistemas autorizados y no autorizados. Esta clasificación se inició en 2008 cuando se publicó por primera vez el Informe Nacional de Disposición Final de Residuos Sólidos. Los sistemas aprobados cuentan con licencias ambientales (Decreto 1076 de 2015), planes de manejo ambiental (para sitios existentes antes de la aprobación de la Ley 99 de 1993), o permisos ambientales correspondientes a actos administrativos que autorizan la operación de sitios. (DNP, 2015).

Se calcula que cada año en todo el mundo se generan 11.200 millones de toneladas de residuos sólidos, y la descomposición de la parte orgánica de estos residuos sólidos representa aproximadamente el 5 % de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero. (ONU, 2022).

Dando un vistazo sobre la normativa de los residuos sólidos en Colombia, se da inicio desde la Constitución Política de 1991, que imparte las Normas Marco, Derechos, Obligaciones, Estado de Derecho y Otras Normas de Colombia. (Rivas, C. 2021).

Seguido de la (Ley 99, 1993), donde el Gobierno instaura Ministerio de Ambiente y Sistema Nacional Ambiental; en la (Ley 142, 1994), se asocia a los Servicios Públicos domiciliarios. El Decreto 596 de 2016, Trata sobre incrementar las tasas de aprovechamiento de los residuos

sólidos en el país y el Decreto Ley 2811 de 1974, corresponde al Código Nacional de Recursos Naturales (ICAG, 2022). Renovables y de Protección al Medio Ambiente.

A nivel internacional, Colombia ha participado en tratados internacionales, enfocados hacia la sostenibilidad ambiental, según el Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, son: Convenio de Diversidad Biológica; Convención de las Naciones Unidas de Lucha Contra la Desertificación y la Sequía; entre otras. (MADS, 2022).

Por el lado internacional, existen los acuerdos como el Convenio de Basilea (CEPAL, 2022); Convenio de Estocolmo, Convenio de Rotterdam (CEPAL, 2022); Convenio de Minamata; Convenio de Viena sobre Ozono; Convenio sobre la Diversidad Biológica (ONU, 2007); Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS, 2015); CITES (Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres) y Convención RAMSAR.

Si bien a nivel nacional e internacional se tienen iniciativas para la sostenibilidad ambiental, en cuanto a la gestión de residuos según el Banco Mundial "en el mundo se generan anualmente 2010 millones de toneladas de desechos y de no tomarse medidas los desechos a nivel mundial aumentarían un 70% para el año 2050." (Banco Mundial, 2018)

Además de esto de acuerdo con el Banco Mundial "actualmente, al menos el 33 % de los desechos se gestionan de forma inadecuada en todo el mundo mediante vertedero a cielo abierto o quema." (Bahada Tata, et al., 2018)

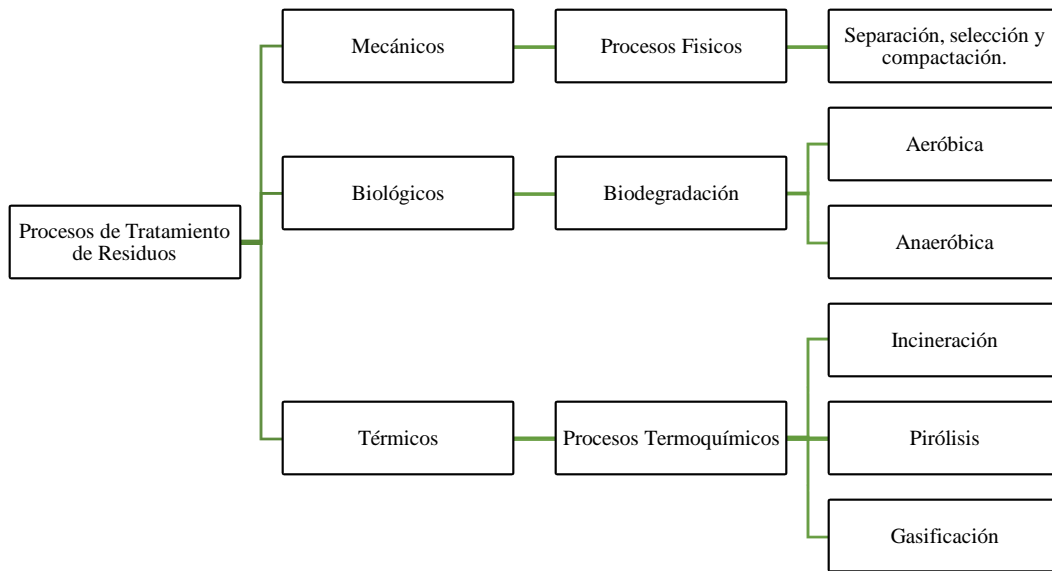
Lo antes mencionado hace que tomar medidas en cuanto a la gestión de los residuos sea una prioridad a nivel mundial, con la finalidad de mitigar esta problemática este trabajo estudia el tratamiento de residuos para el aprovechamiento y valorización de los mismos.

El tratamiento de residuos hace referencia a las operaciones y procesos a los que son sometidos los residuos con la finalidad de aprovechar los recursos contenidos en ellos (Rondón, Szantó, Pacheco, Contreras y Gálvez, p 68), bien sea para incorporarlos a la cadena productiva o para el aprovechamiento energético de los mismos.

Por otro lado, de acuerdo con el documento CONPES 3874 "el aprovechamiento y/o valorización es el proceso de recuperar el valor remanente o el poder calorífico de los materiales que componen los residuos o desechos peligrosos, por medio de la recuperación, el reciclado o la regeneración".

En cuanto a los procesos de tratamiento pueden ser mecánicos, biológicos o térmicos como puede verse en la Figura 1.

Figura 1. Procesos de Tratamiento de Residuos



Nota: Elaboración propia a partir de fuentes bibliográficas.

Con el tratamiento mecánico se realiza la separación, selección y clasificación de la materia prima, con la finalidad de separar los materiales obedeciendo a su uso final, como puede ser: reciclaje, tratamiento biológico o valoración energética. (TNA, 2022).

En cuanto a los tratamientos térmicos hacen referencia a aquellos procesos en los que la transformación de los residuos se obtiene mediante la aplicación de altas temperaturas, las técnicas más conocidas en aprovechamiento térmico son: incineración, gasificación y pirolisis. (INERCO, 2018, diciembre)

La incineración es el proceso de descomposición de los residuos debido a la combustión controlada que se da debido a las condiciones de temperatura (750°C – 1100°C) y la presencia de oxígeno, esta técnica permite disminuir el volumen de los residuos mediante su aprovechamiento para la generación de energía eléctrica o calor. (INERCO, 2018, diciembre)

En el proceso de gasificación los residuos son sometidos a altas temperaturas, se restringe el suministro de oxígeno para evitar la combustión completa de la materia prima, produciendo una mezcla de gases denominada gas de síntesis que puede ser aprovechado para la generación de energía. El proceso consta de varias etapas: secado, pirolisis, oxidación y reducción. (Buentello Montoya, D. y Duarte Ruiz, C., 2020)

Por último, en la pirolisis se da la descomposición térmica de la materia prima mediante la aplicación de calor, en ausencia de oxígeno y bajo temperaturas entre 350 °C y 900 °C, como producto se obtiene un gas similar al gas de síntesis. (Timana, et al., 2022)

Por otro lado, los tratamientos biológicos hacen referencia a la descomposición de los residuos orgánicos por la acción de microorganismos, estos pueden ser de tipo aerobio (compostaje) o de tipo anaerobio para la producción de biogás.

Mediante el tratamiento aerobio de residuos se realiza la producción de compostaje para la obtención de fertilizante orgánico, en este proceso se requieren controlar las siguientes variables: el rango de humedad de la materia prima debe estar entre 25% a 75%, se debe asegurar la presencia de oxígeno, ventilación y temperatura. (Bleda Quilez, S., 2017, p 58).

En cuanto a la digestión anaerobia o biometanización es un proceso biológico en donde debido a la acción de microorganismos da la degradación y descomposición de la materia orgánica presente en los residuos, este proceso se lleva a cabo en ausencia de oxígeno y como producto se obtiene un gas denominado biogás el cual puede ser utilizado para la generación de calor o electricidad. (Edo Alcón, 2019)

Los tratamientos mencionados hasta el momento han sido los más utilizados en los últimos años y si bien contribuyen al aprovechamiento de residuos no son técnicas que se apliquen a grandes escalas.

Es por esto que se hace necesario implementar técnicas que puedan llegar a lograr un mayor impacto ambiental, por ejemplo, países como España y Francia cuentan con plantas para el tratamiento de residuos en donde se busca su procesamiento con la finalidad de aprovechar el potencial energético de los residuos no aprovechables, estas plantas se denominan Plantas de Tratamiento Mecánico Biológico. (Veolia, 2019)

El tratamiento mecánico biológico (TMB) integra las técnicas mecánicas y biológicas anteriormente citadas, su objetivo principal es la valorización energética de los residuos. (Saavedra Jara, 2018)

En la parte mecánica del tratamiento se separa y clasifica la parte reciclable como vidrio, papel, metales, materiales que pueden ser recuperables y la materia orgánica. (Lima Morra, R. y Florentín Lopez, C, 2019)

Por otro lado, en el tratamiento biológico se transforma la materia mediante compostaje o digestión anaerobia para producción de biogás.

Actualmente en Colombia no se cuenta con infraestructura adecuada para el tratamiento de residuos y se carece de proyectos innovadores para el aprovechamiento de los mismos.

De las técnicas anteriormente mencionadas para el tratamiento de residuos, en Colombia a la fecha se ha implementado en gran medida el aprovechamiento mediante compostaje esto debido al conocimiento que se ha adquirido y los bajos costos de este proceso, sin embargo, el país ha venido trabajando en la implementación de otras tecnologías como: la obtención de biogás y la generación de energía a partir de residuos, muestra de esto es la planta de valoración energética instalada en el relleno sanitario Magic Garden en San Andres que se inauguró en el año 2021 con la cual se busca solucionar el manejo de los residuos en la isla e introducir la generación de energía mediante el aprovechamiento de residuos.

Si bien el país se empieza a encaminar en la búsqueda de un mejor aprovechamiento de residuos la situación es crítica, actualmente los principales sistemas de disposición según el informe nacional de disposición final de residuos sólidos 2021 son los rellenos sanitarios y botaderos a cielo abierto, de los 266 sistemas de disposición final que se tenían en el país para el año 2021 el 90% correspondían a estas dos técnicas, adicionalmente datos también obtenidos en este informe especifican que "el aporte de las Plantas de Tratamiento corresponde al 0,20% de toneladas dispuestas (23.868,15 toneladas anuales)".

Mientras que países como Suecia se enfocan en la prevención (no producción de residuos), en reciclar y reutilizar el 99% de los residuos que se generan y en la generación de energía mediante plantas de aprovechamiento para las cuales se requieren importar residuos de países como Italia, Noruega e Irlanda para poder alimentar el sistema. (Ecoinventos, 2018)

En conclusión, Colombia necesita inversión en tecnología, conocimiento, innovación y proyectos a gran escala para el aprovechamiento de residuos, esto con la finalidad de impulsar la economía circular, una adecuada gestión y aprovechamiento de los residuos, para poder llegar a implementar la termovalorización en el país.

3. METODOLOGÍA

3.1. Primer nivel

3.1.1. Enfoque, alcance y diseño de la investigación

El trabajo de investigación tiene un enfoque cualitativo el cual, se guía por áreas o temas significativos de investigación y se encamina a comprender fenómenos, dando claridad sobre las preguntas de investigación e hipótesis que preceda a la recolección y el análisis de los datos. (Hernández, C. y Mendoza C., 2018). Además, posee una naturaleza inductiva que se explica cómo, la metodología que explora y describe, para así mismo generar perspectivas teóricas (Hernández, et al., 2014). De acuerdo a lo anterior, este proyecto busca comprender y analizar la información y las técnicas sobre el aprovechamiento de residuos existentes en el mundo; por consiguiente, el alcance del proyecto tiene la finalidad de lograr los objetivos planteados, estos están demarcados con los criterios SMART (específicos, medibles, alcanzables, relevantes y con marco de tiempo), este alcance garantiza el conocimiento claro de las posibilidades, los riesgos y los límites del proyecto. (Stsepanets, 2021).

El diseño planteado es de tipo no experimental, es decir no hay manipulación de variables y en este caso el tipo de estudio es descriptivo el cual busca aplicar el análisis y síntesis de la información colectada sobre la gestión de los residuos sólidos domiciliarios y comerciales en el país (Hernández, C. y Mendoza C., 2018, p. 213).

El diseño de investigación y la finalidad de este estudio es identificar que tecnología para el aprovechamiento de residuos podría ser la de mejor aplicación en Colombia, esto a partir de la investigación sobre las metodologías de aprovechamiento que se han implementado en el país y en el exterior.

Las etapas establecidas para el desarrollo de la investigación son:

1. Especificar el funcionamiento de las metodologías identificadas para el aprovechamiento de residuos.
2. Detallar la aplicación de las metodologías identificadas por medio de estudios de casos.
3. Por último, mediante las técnicas de análisis de datos determinar cuál podría ser la metodología más adecuada para su implementación en Colombia.

En cuanto a la revisión bibliográfica para llevar a cabo a conformidad el objeto de estudio, se tendrán en cuenta artículos y revistas científicas, libros, manuales técnicos y documentos similares.

Para la búsqueda bibliográfica se considerará:

- a) Palabras clave relacionadas con el objeto de estudio como herramienta para la revisión bibliográfica: aprovechamiento, metodologías de aprovechamiento, residuos, gestión de residuos.
- b) Bases de datos confiables como Scopus y Science Direct y para la obtención de información que contribuya al estudio se tendrá como criterio de búsqueda las palabras claves mencionadas previamente.
- c) Priorización de documentos con fecha de publicación inferior a cinco años.

3.1.2. Definición de Variables

En la Tabla 1 se definen las variables del objeto de estudio.

Tabla 1. *Variables de la Investigación*

Variable	Tipo de Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional
Cantidad de residuos	Variable independiente	Cantidad de residuos generados en Colombia anualmente.	Identificar la cantidad de residuos que se generan en Colombia con el fin de conocer los materiales disponibles para aprovechamiento.

Tipo de residuos	Variable independiente	Hace referencia a la clasificación de los residuos: según la peligrosidad, el origen y su composición. (Flores Lopez, 2014)	Identificar los tipos de residuos que se generan en Colombia para establecer con que tecnología se podrían aprovechar.
Aprovechamiento de residuos	Variable independiente	Procesos mediante los cuales los residuos se reincorporan al ciclo productivo, como por ejemplo mediante: la reutilización, el reciclaje o el compostaje. (Decreto 1713 de 2002)	Identificar los procesos utilizados en Colombia para el aprovechamiento de residuos para de esta manera determinar cuál es la tendencia en el país en cuanto a la implementación de métodos.
Disposición final de residuos	Variable independiente	Hace referencia al proceso de disponer los residuos de forma definitiva en lugares establecidos para ello. (Decreto 1713 de 2002)	Identificar los sitios de disposición final de residuos en Colombia.
Tipos de Tecnologías	Variable independiente	Metodologías utilizadas para la transformación de los residuos.	Identificar las tecnologías actuales para poder determinar: <ul style="list-style-type: none"> • Cómo funcionan. • Tipos de residuos que aprovechan. • Capacidad de aprovechamiento.

-
- Disponibilidad de espacio.
 - Viabilidad económica.
 - Impacto ambiental.
-

Nota. Elaboración propia a partir de fuentes bibliográficas.

3.1.3. Muestra

Para la muestra de la investigación se realizará un muestreo de tipo estudio de caso. De acuerdo con María Martha Durán (2014), "El estudio de caso en la investigación cualitativa es un proceso de indagación focalizado en la descripción y examen detallado, comprehensivo, sistemático, en profundidad de un caso definido, sea un hecho, fenómeno, acontecimiento o situación particular" (p.180), los estudios de caso brindaran a la investigación herramientas para describir, evaluar y comparar la aplicabilidad de las metodologías para el aprovechamiento de residuos.

Para el cumplimiento de los objetivos del presente documento se establece analizar seis estudios de caso.

3.2. Segundo nivel

3.2.1. Selección de métodos o instrumentos para recolección de información

Para abordar este estudio descriptivo y entender las barreras que existen para la implementación de metodologías innovadoras, es necesario contar con información detallada y actualizada sobre el tema. A continuación, se especifican los instrumentos que se consideraran en esta investigación para la recolección de información:

1. Análisis de casos de éxito: Mediante el análisis de casos de éxito o estudios de caso en la implementación de metodologías innovadoras para la gestión de residuos sólidos en otros países y en Colombia, se busca identificar las mejores prácticas y adaptarlas a las condiciones del país, así como aprender de los desafíos y limitaciones que se presentaron en la implementación de estas metodologías en otros contextos.

2. **Revisión de la literatura:** Por medio de una revisión de la literatura científica sobre la gestión de residuos sólidos en Colombia y en otros países, consultando artículos, tesis, informes y estudios que aborden el tema, se busca conocer el estado del arte en la gestión de residuos sólidos, identificar las tendencias y los avances en la materia, así como identificar las barreras y oportunidades para la implementación de metodologías innovadoras.

Una combinación de los métodos descritos anteriormente puede proporcionar una visión más completa y precisa del problema planteado y ayudar a diseñar soluciones más efectivas y sostenibles.

3.2.2. Técnicas de análisis de datos

Las técnicas de análisis de datos son herramientas y procedimientos utilizados para analizar, interpretar y extraer información útil, con el fin de comprender y describir fenómenos, detectar patrones y tendencias, identificar problemas y proponer soluciones. El uso adecuado de estas técnicas permite tomar decisiones basadas en datos y hechos confiables. (Innovación Digital 360, 2022)

Tabla 2. *Técnicas de Análisis de Datos para la Investigación.*

Objetivo	Instrumento	Técnica de análisis de datos	Descripción
Especificar las metodologías que se utilizan en Colombia para el aprovechamiento de residuos.	Análisis de casos de éxito Revisión de literatura	Análisis de contenido	En el contexto de la investigación sobre metodologías de aprovechamiento de residuos en Colombia, se podrá realizar, análisis de contenido para identificar patrones, temas y tendencias en la literatura científica y técnica sobre el tema. Esto implica leer y examinar detalladamente los textos relevantes, identificar las ideas clave, categorizarlas

y analizarlas en función de los objetivos de la investigación. El análisis de contenido es una técnica útil para explorar y comprender la información presente en los documentos, es por ello que se efectuará el análisis enfocado detallando casos de éxito en Colombia, así como una revisión exhaustiva de la literatura científica y técnica relacionada con la gestión de residuos sólidos. Se identificarán y describirán las metodologías utilizadas en el país para el aprovechamiento de residuos, incluyendo la biodigestión, compostaje, reciclaje, entre otros. Se recopilará información sobre los procesos involucrados en cada metodología, los beneficios y limitaciones, así como los resultados obtenidos en términos de eficiencia y sostenibilidad. La información se organizará a través de la herramienta diagrama de procesos y se utilizará la técnica análisis de contenido para evaluar las metodologías en función de criterios predefinidos, como viabilidad técnica, impacto ambiental, costo, escalabilidad, y aceptación social, entre otros.

Identificar metodologías innovadoras que se implementan	Análisis de casos de éxito	Análisis de contenido	La técnica análisis de contenido, consiste en examinar y codificar sistemáticamente el contenido de textos, documentos, imágenes, videos o cualquier otro tipo de
---	----------------------------	-----------------------	---

<p>a nivel internacional para el aprovechamiento de residuos.</p>	<p>Revisión de literatura</p>	<p>material, esto, permitirá obtener una visión integral y objetiva de las metodologías utilizadas a nivel internacional para la gestión de residuos sólidos.</p> <p>Una vez recopilada la información y los estudios de caso, se realizará un análisis detallado, se identificarán y describirán las metodologías utilizadas en el exterior para el aprovechamiento de residuos, identificando los procesos involucrados en cada metodología, los beneficios y limitaciones, así como los resultados obtenidos en términos de eficiencia y sostenibilidad.</p>	
<p>Explicar los criterios del porque no se utilizan metodologías innovadoras en Colombia para el aprovechamiento de residuos.</p>	<p>Análisis de casos de éxito</p> <p>Revisión de literatura</p>	<p>Análisis de contenido</p>	<p>Se analizarán los estudios de caso en Colombia y la revisión de la literatura para identificar las barreras o limitaciones que impiden la implementación de metodologías innovadoras en el país.</p> <p>Se utilizará un análisis de contenido para determinar las posibles causas de la ausencia de implementación de metodologías innovadoras.</p>
<p>Analizar las metodologías innovadoras aplicadas en Colombia y en el exterior con la</p>	<p>Análisis de casos de éxito</p> <p>Revisión de literatura</p>	<p>Matriz multicriterio</p>	<p>Se empleará una matriz multicriterio para evaluar la aplicabilidad y potencial de implementación en el contexto colombiano de las metodologías identificadas en los dos primeros objetivos.</p>

finalidad de verificar las estrategias técnicas y los métodos de mejor aplicabilidad.

Para la matriz se establecen los siguientes criterios de evaluación: funcionamiento, tipos de residuos que aprovecha, capacidad de aprovechamiento, disponibilidad de espacio, viabilidad económica e impacto ambiental. Se asignará un peso a cada criterio en función de su importancia relativa, y se calificará cada metodología en función de su desempeño en cada criterio. Luego, se realizará un análisis de priorización y selección de la mejor metodología o combinación de metodologías en función de los resultados obtenidos en la matriz multicriterio.

Nota. Elaboración propia a partir de fuentes bibliográficas.

Teniendo en cuenta las técnicas de análisis de datos seleccionadas, a continuación, una breve descripción de cada una de ellas:

Análisis de contenido: Esta técnica permite analizar el contenido de diferentes documentos, como políticas públicas, normativas y programas relacionados con la gestión de residuos, con el fin de identificar las metodologías que se están promoviendo en Colombia. (Rondón Toro et al, 2016)

Matriz multicriterio: Es una herramienta de análisis que permite evaluar y comparar múltiples alternativas a través de la ponderación de diferentes criterios. Esta matriz se compone de filas que representan las diferentes alternativas evaluadas y columnas que representan los diferentes criterios a considerar. Cada celda de la matriz representa la calificación de la alternativa en relación con un criterio específico. Luego, se aplican pesos a cada uno de los criterios, y se realiza un análisis para determinar la mejor alternativa en función de los resultados obtenidos. Por consiguiente, es una herramienta útil para la toma de decisiones, ya que permite

evaluar de manera sistemática y objetiva diversas opciones en función de múltiples criterios relevantes. (Fernández Bustillo et al., 2008)

3.2.3. Criterios de evaluación

Para la matriz multicriterio a realizar, se tendrán en cuenta los siguientes criterios de evaluación: funcionamiento, tipos de residuos que aprovechan, capacidad de aprovechamiento, disponibilidad de espacio, viabilidad económica, impacto ambiental. Cada criterio se evaluará en una escala numérica o de puntuación, y se ponderarán de acuerdo con la importancia relativa que se asignará a cada uno en la matriz multicriterio. Los valores obtenidos en la matriz permitirán realizar una evaluación objetiva y comparativa de las metodologías analizadas, para seleccionar la más adecuada en el contexto de gestión de residuos sólidos en Colombia.

Por consiguiente, los criterios de evaluación seleccionados se componen y se describen a continuación:

Funcionamiento: Evaluar la efectividad y eficiencia del funcionamiento de la metodología, considerando la viabilidad de su implementación en el contexto de gestión de residuos sólidos en Colombia. (Rondón Toro et al, 2016)

Tipos de residuos que aprovechan: Evaluar los tipos de residuos que son aprovechados por la metodología, considerando si abarca una amplia gama de residuos o se limita a ciertos tipos específicos. (Ministerio de Comercio, Industria y Turismo [MINCIT]).

Capacidad de aprovechamiento: Evaluar la capacidad de la metodología para aprovechar los residuos sólidos, considerando la cantidad y calidad de los materiales recuperados o procesados. (UAESP, 2014).

Disponibilidad de espacio: Evaluar la necesidad de espacio físico requerido para la implementación de la metodología, considerando la disponibilidad de espacio en el contexto de gestión de residuos sólidos en Colombia. (Unidad de Planeación Minero Energética [UPME]).

Viabilidad económica: Evaluar la viabilidad económica de la metodología, considerando los costos asociados a su implementación, operación y mantenimiento, así como los beneficios económicos generados. (Cámara Oviedo, 2010)

Impacto ambiental: Evaluar el impacto ambiental de la metodología, considerando su contribución a la reducción de la contaminación y la promoción de prácticas sostenibles en la gestión de residuos sólidos. (Rondón Toro et al, 2016)

Por lo anterior, el análisis de casos de éxito y revisión de la literatura se recopilará información relevante sobre las metodologías innovadoras y se utilizará como base para la evaluación en la matriz multicriterio. El análisis de los datos obtenidos en la matriz multicriterio permitirá realizar una selección informada y fundamentada de la metodología más adecuada para la gestión de residuos sólidos en Colombia.

4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

4.1. Metodologías implementadas en Colombia para el aprovechamiento de residuos.

Según el informe nacional de disposición final de residuos sólidos en Colombia, realizado por la Super Intendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, en el año 2021 fueron dispuestas 11.952.440 toneladas de residuos sólidos, de las cuales 11.801.299 toneladas fueron dispuestas en sistemas autorizados esto correspondiente al 98,74% del total y 151.142 toneladas fueron dispuestas en sistemas no autorizados, en la tabla 3 se consolida la información estadística recopilada en el informe de disposición final, de donde se puede inferir que actualmente en el país la gestión de residuos está orientada en depositar los residuos principalmente en rellenos sanitarios y no al aprovechamiento energético de los mismos. (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios [SSPD]. 2023).

Tabla 3. Estadísticas de Disposición Final de Residuos Sólidos en Colombia para el año 2021

Ítem	Sistema	Autorizado	No Autorizado	Toneladas Anuales Dispuestas	Porcentaje	Numero de Sistemas
1	Quema		X	0	0%	0
2	Cuerpo de agua		X	0	0%	0
3	Enterramiento		X	0	0%	0
4	Planta de Tratamiento	X		0	0%	0
5	Celda transitoria		X	26.538,23	0,2%	12
6	Celda de contingencia	X		189.413,56	1,6%	12
7	Botadero a cielo abierto		X	124.603,37	1,0%	77
8	Relleno sanitario	X		11.611.885,75	97,2%	165

Fuente. Adaptado de Informe Nacional de Disposición Final de Residuos Sólidos 2021 (p. 7), por SSPD, 2023.

4.2. Descripción de las metodologías de aprovechamiento de residuos implementadas en Colombia

El informe de aprovechamiento que realiza la Super Intendencia de Servicios Públicos Domiciliarios está enfocado en la actividad de aprovechamiento mediante reciclaje en donde para el año 2020 se reportaron en total 1.903.269 toneladas aprovechadas por 561 prestadores, sin embargo, en cuanto a tratamiento de residuos mediante tecnologías como compostaje, digestión anaerobia, plantas de biogás, tratamiento mecánico biológico, entre otras, no se tiene medición. (SSPD, 2022)

Teniendo en cuenta lo anterior y adicionalmente el hecho de que actualmente la mayor parte de los residuos generados son dispuestos en rellenos sanitarios desperdiciando su valor, el banco mundial junto con el gobierno nacional contrataron una consultoría para evaluar la situación actual del tratamiento de residuos en el país, de donde se pudo identificar que existen más de 30 plantas locales y regionales para el tratamiento de residuos orgánicos, varias plantas llevan más de 35 años en el mercado, algunas de ellas son operadas por empresas públicas y otras por empresas privadas y actualmente dado el conocimiento y la tecnología que se tiene en el país, las acciones se centran en el aprovechamiento de residuos mediante la producción de compostaje y no en la valoración energética de los residuos. (Banco Mundial et al., 2021)

Finalmente, a continuación, se describen las principales tecnologías que se han implementado en el país, dado a que actualmente en Colombia no se cuenta con un informe de aprovechamiento de residuos mediante tecnologías de tratamiento, se tomó como referencia el informe de la consultoría realizada para el diagnóstico y evaluación del tratamiento de residuos sólidos en Colombia, del cual se logró identificar que la principal metodología para el aprovechamiento de residuos en el país es el compostaje y en cuanto a procesos innovadores el informe menciona el proceso de digestión anaerobia con el aprovechamiento del biogás mediante las plantas de biogás aunque cabe aclarar que en esta tecnología hasta ahora se está incursionando.

4.2.1. Compostaje

Según el informe del tratamiento de residuos sólidos en el marco del servicio público de aseo del año 2021, en Colombia las tecnologías implementadas para el aprovechamiento de residuos

se centran en la producción de compostaje, a continuación, se describen los principales aspectos de este proceso.

El compostaje es un proceso biológico aerobio que se da en presencia de oxígeno y bajo condiciones de ventilación, humedad y temperatura controladas, en este proceso se transforman los residuos orgánicos en insumos para la producción agrícola. (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]., 2013) y su proceso consiste en la descomposición de los residuos a causa de la acción microbiana de hongos y bacterias, la duración del proceso varía dependiendo de distintos factores como lo son: el tipo de sistema, tecnología implementada y la disponibilidad de espacio, sujeto a esto el compostaje puede tomar de 10 a 16 semanas. (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico [MITECO], s.f.). De acuerdo a la variación de la temperatura que se presenta en el curso del proceso, se dan tres etapas principales, además de una etapa de maduración de duración variable. (FAO, 2013)

Fase Termófila: puede tardar días o meses dependiendo de las condiciones de proceso, al alcanzar temperaturas superiores a los 45 grados aparecen microorganismos en su mayoría bacterias (termófilos) que degradan fuentes más complejas de carbono, también llamada como fase de higienización ya que en esta se eliminan las bacterias y contaminantes de origen fecal. (FAO, 2013)

Fase de Enfriamiento o Mesófila II: posterior a la eliminación de las fuentes de carbono y nitrógeno la temperatura disminuye de nuevo hasta los 40 - 45 grados, aquí continua la degradación de polímeros como la celulosa y el pH desciende levemente, esta fase tarda varias semanas. (FAO, 2013)

Además, es oportuno mencionar que los factores más importantes a controlar en el proceso de compostaje son: la temperatura, oxígeno, humedad, pH, tamaño de la partícula y relación C/N. Por otro lado, la capacidad de aprovechamiento de las plantas de compostaje depende de diferentes factores que influyen en la cantidad de residuos que pueden ser procesados, factores como la tecnología implementada, tipo y tamaño de la planta. Actualmente en Colombia se tienen desde composteras en fincas hasta plantas de compostaje privadas y otras manejadas por el servicio público de aseo y el espacio requerido para el proceso dependerá del sistema elegido, tamaño de la planta y la capacidad de producción. Para finalizar, esta metodología impacta positivamente al medio ambiente, como ejemplo se pueden revisar los siguientes puntos: mejora el suelo, restaura el paisaje y previene la contaminación.

4.2.2. Proceso de digestión anaerobia

Como se mencionó anteriormente, en el país también se ha implementado el aprovechamiento de residuos orgánicos con alto contenido de humedad mediante la descomposición de los mismos por medio del proceso de digestión anaerobia, que es un proceso biológico que se da en ausencia de oxígeno y en donde por la acción microbiana, la materia prima se descompone en una mezcla de gases denominada biogás, compuesto principalmente por CH₄, CO₂, H₂ y H₂S, por otro lado, del proceso se obtiene como subproducto el digestato, el cual es una mezcla de productos minerales rico en nitrógeno, fósforo y potasio. (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía [IDAE], 2007). Además, su proceso se lleva a cabo debido a la acción microbiana y se da en cuatro fases consecutivas: hidrólisis, acidogénesis o fermentación, acetogénesis y metanogénesis.

Hidrólisis: "En esta etapa los compuestos orgánicos son solubilizados por enzimas excretadas por bacterias hidrolíticas que actúan en el exterior celular por lo que se consideran exoenzimas. La hidrólisis es, por tanto, la conversión de los polímeros en sus respectivos monómeros". (Acosta, L et al., 2005, p. 37)

Acidogénesis: "En esta etapa los compuestos orgánicos solubles que comprenden los productos de la hidrólisis son convertidos en ácidos orgánicos tales como acético, propiónico y butírico, fundamentalmente". (Acosta, L et al., 2005, p. 37)

Acetogénesis: Se le conoce también como acidogénesis intermediaria en la cual los productos correspondientes son convertidos en ácido acético, hidrógeno y CO₂. (Acosta, L et al., 2005, p. 37)

Metanogénesis: En esta última fase se da la producción del biogás a partir de compuestos sencillos de carbono, en esta etapa el metano es generado a partir de ácido acético o de mezclas de hidrógeno y dióxido de carbono. (Acosta, L et al., 2005, p. 37)

Esta metodología impacta positivamente al medio ambiente, como ejemplo se pueden revisar los siguientes puntos:

- Contribuye a la disminución de emisiones de dióxido de carbono y metano y a la reducción de olores.
- Con el biogás obtenido del proceso se puede producir energía.
- Consumo de energía bajo.

4.2.3. Plantas de Biogás

Las plantas de biogás tienen como principal objetivo el aprovechamiento del biogás obtenido del proceso de digestión anaerobia, se enfoca en el aprovechamiento con la finalidad de producir energía eléctrica o térmica bajo un mecanismo de desarrollo sostenible

A continuación, se especifican los elementos claves en el proceso que se lleva a cabo en las plantas de biogás:

1. Recepción de los residuos en las instalaciones debidamente adecuadas para esto.
2. Digestión anaerobia que se da en los biodigestores.
3. Almacenamiento de los gases.
4. Almacenamiento del digestato.
5. Tratamiento del biogás.
6. Planta de cogeneración.
7. Alimentación de corriente a la red pública

La capacidad de aprovechamiento depende del tamaño de la planta y tipo de tecnología utilizada y el espacio requerido de igual manera dependerá del tipo y tamaño de planta. Para finalizar, estas plantas de biogás pueden requerir de altos costos de inversión, esto dependerá de la capacidad de la planta y tipo de tecnología utilizada.

4.3. Casos de estudio sobre las metodologías de aprovechamiento de residuos implementadas en Colombia

En cuanto a los casos de estudio se establece revisar un caso por tipo tecnología de aprovechamiento de residuos implementada en Colombia, es decir se analizará un caso para el tratamiento de residuos mediante compostaje y un caso para el aprovechamiento de residuos mediante plantas de biogás.

Por otro lado, se fijaron los siguientes criterios de selección para la elección de los casos de estudio:

1. La relevancia y representatividad del caso para el país.
2. La disponibilidad de información.

De acuerdo a lo anterior, a continuación, se especifican los casos de estudio para las metodologías de aprovechamiento de residuos en Colombia.

4.3.1. Relleno Sanitario Biorgánicos del Sur del Huila

El Relleno Sanitario Biorgánicos del Sur del Huila fue seleccionado como caso de estudio ya que en el informe de diagnóstico y evaluación del tratamiento de residuos sólidos en Colombia, se evidencia que esta fue la planta de compostaje visitada y aun activa que presentó la mayor cantidad de residuos procesados al mes y adicionalmente esta cuenta con el informe de seguimiento a sitios de disposición final que realiza la SSPD con la finalidad de verificar las condiciones de operación de la planta.

Biorgánicos del Sur del Huila pertenece al servicio público de aseo, es un claro modelo del aprovechamiento de los residuos orgánicos con el objetivo de producir compost, en la tabla 4 se describen los principales aspectos de este caso de estudio.

Tabla 4. Aspectos Descriptivos del caso de estudio Relleno Sanitario Biorgánicos del Sur del Huila, Pitalito, Huila

Aspectos	Descripción
Nombre de la Planta	Biorgánicos del sur del Huila S.A. E.S.P.
Ubicación	Vereda Llanogrande, en el kilómetro 8 vía San Agustín - Pitalito, Huila.
Año de inicio	1997
Tecnología Implementada	Planta de compostaje.
Proceso	Biorgánicos del Sur del Huila aun cuando hace parte del sistema de servicio público de aseo se dedica netamente a la actividad de disposición final, implementando la actividad de tratamiento y no las actividades de recolección y transporte. A continuación, se especifica el proceso de tratamiento que se lleva a cabo en el relleno sanitario para el tratamiento de la materia orgánica y la producción de compost:

-
1. En primera instancia se reciben los residuos de los nueve municipios del sur del Huila, llegan aproximadamente 1500 ton/mes.
 2. Los residuos sólidos ingresan a la planta para ser clasificados y separados en aprovechables orgánicos, aprovechables inorgánicos e inservibles.
 3. Los residuos inorgánicos aprovechables son clasificados para ser comercializados y los residuos orgánicos aprovechables ingresan a la planta de compostaje.
 4. Los residuos que ingresan a la planta de aprovechamiento son descargados en el área de compostaje en donde por un periodo de 30 a 45 días se realiza un volteo de pilas y la aplicación de microorganismos con la finalidad de acelerar el proceso.
 5. De este proceso se obtiene el abono, el cual posteriormente pasa a proceso de mejora de estándares de calidad.
-

Tipo de residuos que aprovecha Residuos orgánicos aprovechables.

Capacidad de aprovechamiento Según el informe de diagnóstico y evaluación del tratamiento de residuos sólidos en Colombia, las plantas de tratamiento que hacen parte del servicio público de aseo tienen una menor capacidad de aprovechamiento, lo cual es la excepción para el caso de estudio ya que generalmente las plantas bajo el servicio público procesan de 800 a 1700 ton/ mes mientras que Biorgánicos del Huila para el año 2020 procesaba 2.550 ton/mes, estando así también por encima de la capacidad de producción de las plantas privadas para el mismo periodo de referencia. (Banco Mundial – Tratamiento de residuos sólidos en el marco del servicio público de aseo)

Disponibilidad de espacio El relleno sanitario tiene una extensión de 17 hectáreas, de las cuales 4.75 hectáreas se utilizan para la separación de residuos, áreas de compostaje y disposición final. (Banco Mundial – Tratamiento de residuos sólidos en el marco del servicio público de aseo)

Viabilidad económica	<p>Según el informe de diagnóstico y evaluación del tratamiento de residuos sólidos en Colombia, Biorgánicos del Huila cubre sus costos de operación con el pago que realizan los prestadores del servicio de recolección y transporte, por tonelada dispuesta en el relleno sanitario, esto ya que los ingresos por la venta de compostaje no son suficientes para el sostenimiento de la planta, cabe mencionar que la planta cuenta con diferentes fuentes de ingresos: una debido al cobro por tonelada dispuesta, dos la venta de material inorgánico aprovechable y tres la comercialización del abono orgánico.</p>
Impacto ambiental	<p>Con esta planta se aporta positivamente al medio ambiente ya que: recibe y aprovecha los residuos que generan los nueve municipios del sur del Huila, con el abono orgánico obtenido del proceso se contribuye a la regeneración de las tierras de monocultivos, aporta a la disminución de residuos para disposición final y a la disminución de gases de efecto invernadero.</p>
Soporte Fotográfico	<p>Figura 2. <i>Zona de Compostaje en Biorgánicos del Sur del Huila</i></p>  <p><i>Nota. Tomado de Informe de Seguimiento a Sitios de Disposición Final (p.15), por SSPD.</i></p>

Nota. Elaboración propia a partir de fuentes bibliográficas.

4.3.2. Biogás Doña Juana

Actualmente en Colombia no se cuenta con un censo o información formal y completa que especifique la cantidad de plantas de biogás existentes y activas en el país, que permita realizar un adecuado análisis en cuanto a la relevancia o representatividad de las plantas existentes, sin embargo la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos (UAESP) especifica que el relleno sanitario Doña Juana es el único relleno sanitario en el país que aprovecha el biogás para la generación de energía, lo que convierte a Biogás Doña Juana en el caso de estudio más representativo de este tipo de tecnología, muestra de esto es que Biogás Doña Juana fue la primera planta de generación de energía eléctrica para el sistema interconectado nacional (Biogás Colombia, s.f.), adicionalmente fue ganadora del Premio de Eficiencia Energética de Andesco en el año 2021 y en el periodo de septiembre de 2019 a diciembre de 2021, la planta redujo 6.949.288 toneladas de dióxido de carbono. (UAESP, 2022)

Biogás Doña Juana es una iniciativa privada y es un claro ejemplo del aprovechamiento del biogás generado en el relleno sanitario a causa de la descomposición de los residuos para la generación de energía, en la tabla 5 se describen los principales aspectos de este caso de estudio.

Tabla 5. Aspectos Descriptivos del Caso de Estudio Biogás Doña Juana

Aspectos	Descripción
Nombre de la Planta	Biogás Doña Juana
Ubicación	Relleno sanitario Doña Juana, Avenida Boyacá Km 5 vía al Llano
Año de inicio	2007
Tecnología Implementada	Planta de biogás
Proceso	El proceso desde la recolección de los residuos hasta la generación de energía se lleva a cabo en las siguientes etapas: <ol style="list-style-type: none">1) Recolección de residuos.2) Disposición de los residuos de manera técnica en celdas impermeabilizadas, con drenaje de lixiviados y sistemas de emisión de biogás.

	<p>3) Descomposición anaerobia, por la cual se inicia la producción de biogás.</p> <p>4) Captación y transporte del biogás hasta la planta, en la cual se efectúa la quema de metano y generación de energía.</p>
Tipo de residuos que aprovecha	Residuos sólidos urbanos.
Capacidad de aprovechamiento	Actualmente la planta tiene una capacidad de generación de energía de 1.7 megavatios y se tiene proyectado aumentar la capacidad instalada a 25 megavatios. (Africano, M. 2021)
Disponibilidad de espacio	La planta está instalada en el relleno sanitario Doña Juana.
Viabilidad económica	Biogás Doña Juana es una concesión entre el Distrito y Biogás Colombia para el aprovechamiento del biogás generado en el relleno sanitario, esta planta recibe ingresos por los certificados de reducción de emisiones expedidos por las Naciones Unidas y el cobro por la generación de energía. Según la UAESP semestralmente Biogás Doña Juana debe pagar una regalía al distrito correspondiente a los ingresos generados por la planta, para el año 2021 Biogás Doña Juana pago al distrito por concepto de regalías la suma de 2.475 millones de pesos correspondientes a las regalías por los ingresos de este periodo.
Impacto ambiental	<p>Esta planta impacta positivamente al medio ambiente, como ejemplo se pueden revisar los siguientes puntos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Según la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos con esta planta dejan de llegar anualmente 800 mil toneladas de dióxido de carbono a la atmosfera. • Contribuye a la disminución de residuos que van a disposición final en el relleno sanitario. • Contribuye a la generación de energía eléctrica sostenible a partir de los residuos que se disponen en el relleno sanitario.

-
- Se obtienen bonos de carbono.
 - Evita la proliferación de olores.
-

Soporte
Fotográfico

Figura 3. *Planta de Biogas Doña Juana*



Nota. Tomado de Biogás Doña Juana gana el Premio de Eficiencia Energética de Andesco, por Alcaldía de Bogotá.

Nota. Elaboración propia a partir de fuentes bibliográficas.

4.4. Metodologías innovadoras que se implementan a nivel internacional para el aprovechamiento de residuos.

A nivel internacional existen diversas metodologías para el aprovechamiento de residuos, tecnologías y metodologías que aún no se encuentran en Colombia por viabilidad económica, social, técnica o ambiental. Los criterios que se utilizaron para la identificación de estas metodologías y su aplicabilidad fueron las siguientes:

- Tecnologías adecuadamente establecidas en el mundo
- Impacto ambiental
- Impacto social
- Potencial de recuperación de recursos
- Manejo y composición de residuos

De acuerdo con lo anterior, se establecieron tres metodologías: Termovalorización, tratamiento Mecánico-Biológico y Gasificación por plasma.

4.4.1. Termovaloración:

La termovalorización es una de las metodologías más significativas a nivel mundial para el aprovechamiento de residuos inorgánicos y orgánicos, debido a que es una forma práctica de obtener energía, y así poder satisfacer la economía circular y tener un mundo más sustentable. Se encuentran una gran cantidad de países en los que esta práctica se aplica y funciona muy bien, ya que disminuye ampliamente el impacto ambiental. (El valor de los residuos, 2022) debido a que aprovechan el calor que se puede obtener de los residuos inorgánicos para obtener, por ejemplo, energía eléctrica, siendo un proceso de alimentación continua de residuos, además

Es una tecnología que contribuye a reducir las emisiones de CO₂, es decir, transforma y aprovecha la basura inorgánica que ya no se puede reciclar, en energía. (GTA Ambiental, 2022), y se basa en tres etapas: Abrasión, conversión a electricidad y distribución: En la **primera etapa** los residuos son expuestos a altas temperaturas durante un periodo corto de tiempo para producir gases calientes que servirán para generar vapor de agua. En la **segunda etapa**, el vapor del agua alimenta a una turbina para la generación de energía eléctrica, para que **finalmente** esta pueda ser distribuida para su uso. Además, tiene condiciones de combustión controlada para maximizar el aprovechamiento y recuperación de energía. (Residuos, 2022)

Aunque cuenta con un alto costo de capital, mantenimiento y operación, es una tecnología que ayuda a regular las emisiones asegurando que se cumpla con la normativa de cada país, además no tiene relación alguna con el agotamiento de la capa de ozono y evita daños en la salud de las personas. Es una excelente forma de gestionar residuos ya que puede reducir la cantidad de residuos, disminuir la huella de carbono y generar energía, contribuyendo a reducir las emisiones de CO₂. (Ecología, 2018)

4.4.2. Tratamiento Mecánico-Biológico

La importancia del tratamiento Mecánico-Biológico (TMB), “Es la separación de materiales inorgánicos para reciclar y de material orgánico para tratar y disminuir su volumen, con la meta de obtener productos comercializables y también minimizar la cantidad de residuos dispuestos en rellenos sanitarios” (Fuentealba, J., 2018, p.10).

Los tratamiento mecánico-biológico, TMB, (o biológico-mecánico, TBM) “Son la combinación de procesos físicos y biológicos para el tratamiento de los residuos o fracciones de residuos con contenido significativo de materia orgánica” (MITECO, 2021, párr.1). El potencial valor que puede obtenerse de los residuos está relacionado a la capacidad que estos tienen en cuanto a la generación de energía, materia prima para nuevos productos y elaboración de insumos utilizados como abono para terrenos, entre otros. (Fuentealba, J., 2018, p.17).

Su proceso se sabe en diferentes etapas, “la primera etapa está conformada por el tratamiento mecánico (aunque algunas instalaciones pueden invertir los procesos), que incluye además de la recuperación de materiales valorizables, la separación de la materia orgánica contenida en la fracción de entrada” (MITECO, 2021, párr.4). Los procesos biológicos según el Ministerio para la Transición Ecológica y el Retomo Demográfico (2021), Que integran pueden utilizar las distintas tecnologías existentes, y diferentes combinaciones.

Esta metodología impacta positivamente al ambiente, por consiguiente, se puede observar algunas ventajas que se muestran a continuación según Ministerio para la Transición Ecológica y el Retomo Demográfico (2021): Separación y reutilización de materiales que sean activos, además adaptar flujos de salida de los procesos para su destino final o valorización, y así reducir el volumen a disponer con el fin de disminuir el tamaño del relleno sanitario o alargar su vida útil y generar electricidad a partir del aprovechamiento térmico de la fracción con alto valor calorífico y/o con las emisiones capturadas de biogás. (p.6)

4.4.3. Gasificación por plasma

Para finalizar, se consideró una última metodología que se basa en convertir los residuos orgánicos en gas sintético, electricidad y esto se da mediante el uso del plasma, con ayuda de altas temperaturas la materia orgánica se transforma del estado sólido al estado gaseoso, además el gas así obtenido se puede utilizar no solo como combustible, sino también como materia prima para la consecuente producción de diferentes materias. (SHW Group, 2021, párr. 2).

De esta forma, se obtiene como producto final, un gas cuyos componentes básicos según (MITECO, 2021, párr.2).:

1. Gas, compuesto fundamentalmente por monóxido de carbono e hidrógeno.
2. Residuo sólido, consistente en una escoria inerte generalmente vitrificada.

Figura 4. Descripción del Proceso de Gasificación por Plasma



Fuente. Tomado de Revisión de la gasificación por plasma (p.5), por Giovanni Muñoz Bolaños

Aunque pueden incurrir a los altos costos de operación, su impacto ambiental puede beneficiar la población, debido que reduce las emisiones de gases de efecto invernadero, por lo tanto, las temperaturas tienen niveles que permiten la disociación de la mayoría de los elementos. Y el gas producido se filtra y se purifica para transformarlo en energía. (Muñoz, G, 2018, p.9). Para finalizar, esta energía puede ser utilizada para suplir necesidades, igualmente, elimina totalmente los residuos y cuenta con una recuperación de subproductos útiles.

4.5. Casos de estudio metodologías innovadoras

Dado a lo anterior, se escogieron 4 casos de estudio a nivel mundial para entender e identificar la aplicabilidad de las metodologías mencionadas anteriormente. Estos casos de estudio se definieron con los criterios:

1. La relevancia y representatividad que tienen las plantas de aprovechamiento en estas metodologías a nivel mundial.
2. Disponibilidad de información sobre las plantas.

4.5.1. Plantas de termovalorización:

En este apartado, se identificaron 2 plantas relevantes a nivel mundial, a pesar de que actualmente existen alrededor de **1.440 plantas de termovalorización en el mundo** con buenas experiencias y resultados en relación con la gestión de RSU, como lo son: Japón con mil 210 plantas Alemania con 99 plantas, Francia con 126 plantas, Europa y Rusia con 276 plantas, China con 225 plantas y resto de Asia con 62 plantas. Y para finalizar, En Estados Unidos de Norteamérica operan 99 plantas de Termovalorización o Waste to Energy (WTE) valorizando 240 millones de toneladas anuales de residuos no reciclables para producir energía eléctrica (Roberto, A., 2018, párr.8).

Tal es el caso de la planta Maresme en Barcelona, España, la cual aprovecha el proceso para abastecer la red de calefacción de uno de los principales hospitales de la ciudad, además de brindar servicio a 28 municipios de la comarca del Maresme, beneficiando a unos 470 mil habitantes (Ecología, 2018, párr.8), como se puede observar en la tabla 6.

Tabla 6. Aspectos Descriptivos del Caso de Estudio Planta Maresme en Barcelona, España

Aspectos	Descripción
Nombre de la Planta	Planta Maresme en Barcelona, España.
Ubicación	Camí del Crist, s/n, 08340 Vilassar de Mar, Barcelona, España
Año de inicio	2010
Tecnología Implementada	Tratamiento mecánico biológico (triaje, compostaje, metanización) y valorización energética de más de 250.000 toneladas de residuos por año.

Proceso	En la instalación se gestionan los siguientes procesos: reciclaje de resto, compostaje, biometanización, depuración e incineración.
Tipo de residuos que aprovecha	<ul style="list-style-type: none"> • Residuos mezclados que todavía contienen materiales recuperables • Residuos voluminosos • Materia orgánica, vidrio, envases, papel y cartón
Capacidad de aprovechamiento	Capacidad para 190.000 t/a de Fracción RESTO de RU, procesos de Reciclaje, biometanización y valoración térmica, y 25.000 t/a de Fracción Orgánica de RU, con procesos de transferencia (40-60).
Disponibilidad de espacio	Superficie construida: 30.000 m ² Potencia total instalada: 8.600 KW
Viabilidad económica	Altos costos.
Impacto ambiental	<ul style="list-style-type: none"> • Garantiza el máximo aprovechamiento y valorización de los residuos municipales a la comarca del Maresme. • Energía suficiente para abastecer 450.000 hogares
SopORTE Fotográfico	Figura 5. <i>Planta Maresme en Barcelona, España.</i>



Fuente. Tomado de Centro de Valorización de Residuos del Maresme, por Sacyr Servicios.

Nota. Elaboración propia a partir de fuentes bibliográficas

Por otro lado, en la tabla 7, se puede visualizar que China es uno de los países con mayor cantidad de Plantas de Termovalorización y en Shenzhen se encuentra una de las plantas más grandes e importantes.

Tabla 7. Aspectos Descriptivos del Caso de Estudio Planta de Shenzhen

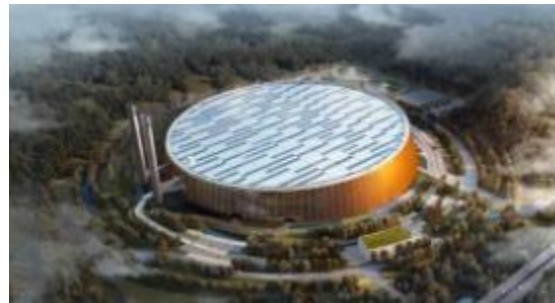
Aspectos	Descripción
Nombre de la Planta	Planta de Shenzhen
Ubicación	A las afueras de Shenzhen, China
Año de inicio	2020
Tecnología Implementada	Termovalorización
Proceso	Esta instalación funciona como una incineradora de basuras , pero, en vez de limitarse a quemar, un ciclo termodinámico que mueve alternadores y produce energía eléctrica aprovechará la energía en forma de calor que se generará en el proceso (Residuos, 2016).
Tipo de residuos que aprovecha	Residuos orgánicos e inorgánicos
Capacidad de aprovechamiento	La planta maneja 5.000 tn de residuos diarios dentro de una estructura simple, limpia e icónica.
Disponibilidad de espacio	El techo de 66.000 m ² está diseñado para ser cubierto por hasta 44.000 m ² de paneles fotovoltaicos, ofreciendo la oportunidad a la fábrica no sólo proporcionar una manera más limpia de manejar los residuos de la ciudad, sino también contribuir a la provisión de energía renovable. (Residuos, 2016, párr. 6).
Viabilidad económica	Planta de alto costo.

Impacto ambiental

- No solo es eliminar grandes cantidades de basura, sino **proporcionar electricidad** para la ciudad
- Reduce un tercio de los residuos diarios
- Disminuye la huella de carbono y generar energía
- Genera un porcentaje realmente bajo de residuos, que pueden ser reutilizados como materiales para la construcción.
- Genera energía

Soporte Fotográfico

Figura 6. *Planta de Shenzhen*



Fuente. Tomado de China construye la mayor planta de valorización de residuos del mundo, por Residuos Profesional.

Nota. Elaboración propia a partir de fuentes bibliográficas

4.5.2. Planta Mecánica-Biológica

Para este caso de estudio, se tomó de referencia una planta con bastante recorrido y reconocida a nivel mundial, aunque está ubicada en España. Esta planta busca reducir los residuos domésticos, y que tengan un tratamiento de lixiviados, también, realizan eliminación de residuos en horno incinerador y cuentan con celdas para el vertido de algunos residuos no peligrosos de Menorca, como se puede observar en la tabla 8.

Tabla 8. *Aspectos Descriptivos del Caso de Estudio Planta de tratamiento de residuos de Milá*

Aspectos	Descripción
Nombre de la Planta	Planta de tratamiento de residuos de Milá (Menorca)
Ubicación	07701 Mahón, Islas Baleares, España
Año de inicio	2019

Tecnología Implementada	Planta Mecánica-Biológica
Proceso	Permitirá optimizar el tratamiento específico de la materia orgánica y perfeccionar la separación de los distintos materiales presentes en las cinco fracciones de residuos para su reciclaje posterior, de forma que se minimicen las cantidades de desecho que se destinen al vertedero (Interempresas, 2022, párr. 3).
Tipo de residuos que aprovecha	Residuos orgánicos
Capacidad de aprovechamiento	La planta de tratamiento mecánico-biológico permite el procesamiento de 50.000 toneladas anuales de fracción resto (35 toneladas por hora), de las que se consigue recuperar más del 70% del material para su reciclaje o valorización. En cuanto a la fracción de envases ligeros, la planta procesa más de 4.000 toneladas anuales, logrando recuperar el 90% de este residuo para su posterior reciclaje (Interempresas, 2022, párr. 13).
Disponibilidad de espacio	<p>El depósito controlado es una instalación perfectamente aislada donde se depositan todos los residuos peligrosos y no peligrosos que no pueden ser valorizados ni reutilizados. El depósito está diseñado con celdas para cada tipo de residuo estancas, separadas, recubiertas y aisladas entre sí y con el medioambiente (Interempresas, 2022).</p> <p>Capacidad residuos no peligrosos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1.500.000 m³ <p>Capacidad residuos peligrosos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 4.819 m³
Viabilidad económica	La inversión de la planta fue de 20 millones de euros
Impacto ambiental	<ul style="list-style-type: none"> • Gestiona las fracciones resto, papel y cartón, vidrio, envases ligeros y materia orgánica, el Área de Gestión de Residuos de Milán cuenta con un horno incinerador para la eliminación controlada de residuos (Interempresas, 2022).

- Cuenta con un aula ambiental para formación y divulgación destinada a acercar el cuidado del medio ambiente a todos los grupos de interés involucrados: empresas, asociaciones, sector educativo, grupos de investigación y la ciudadanía en general (Interempresas, 2022).
- Ha logrado mejorar el rendimiento respecto a los parámetros de diseño, de forma que sólo ha ido al vertedero aproximadamente un 26% del residuo que ha entrado en planta, en vez del 30% inicialmente calculado (Interempresas, 2022).

Soporte Fotográfico

Figura 7. *Planta de tratamiento de residuos de Milá (Menorca)*



Nota. Tomado de Inaugurada la nueva planta de tratamiento de residuos de Milà (Menorca), por Interempresas.

Nota. Elaboración propia a partir de fuentes bibliográficas

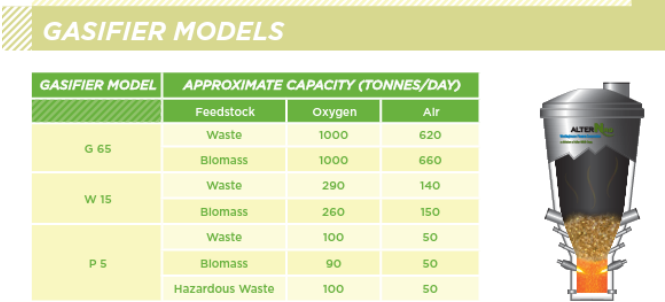
4.5.3. Planta de Gasificación por Plasma

Para finalizar, el último caso de estudio se puede observar en la tabla 9 que se investigó fue Gasificación por Plasma, en que se puede visualizar todo el proceso de gasificación y lo aplicable que podría ser en Colombia y los beneficios que conlleva para minimizar el impacto ambiental:

Tabla 9. *Aspectos Descriptivos del Caso de Estudio The Westinghouse Plasma Gasification*

Aspectos	Descripción
Nombre de la Planta	The Westinghouse Plasma Gasification
Ubicación	Teesside, Reino Unido

Año de inicio	2007
Tecnología Implementada	Planta de Gasificación por Plasma
Proceso	LA ISLA DEL GASIFICADOR DETRÁS DEL SYNGAS funciona a temperaturas de 5500 °C (10 000 °F), lo que garantiza una conversión completa de la materia prima en gas de síntesis. Los materiales inorgánicos se liberan en la base del gasificador como una escoria inerte que se enfría y es un producto benigno no lixiviable que se puede vender como agregado para la construcción. El proceso de gasificación Westinghouse Plasma es altamente eficiente. La energía total recuperada de las materias primas procesadas por el gasificador de WPC es de aproximadamente el 80 % (NRG Corp, s.f., p.7)
Tipo de residuos que aprovecha	Residuos inorgánicos
Capacidad de aprovechamiento	Figura 8. <i>Capacidad de aprovechamiento de la planta de gasificación por plasma</i>



Fuente. Tomado de *Clean, sustainable energy recovery through plasma gasification (p. 8)*, por NRG Corp.

Viabilidad económica	Los costos totales del proyecto que oscilan entre \$30 y \$300 millones, lo que hace que la tecnología de plasma sea accesible en todo el mundo.
Impacto ambiental	<ul style="list-style-type: none"> Recuperación de energía flexible y eficiente

-
- La gasificación genera hidrógeno y monóxido de carbono: una corriente de gas rica en energía
 - El proceso de gasificación por plasma WPC produce una variedad de productos, como electricidad, vapor y combustibles líquidos, al tiempo que reduce las emisiones de gases de efecto invernadero nocivos (NRG Corp, s.f.)
 - Mezcla cualquier número de materias primas sólidas o líquidas
 - La capacidad de mezclar materias primas reduce el proyecto el riesgo de la materia prima y aumenta significativamente la economía del proyecto Alta confiabilidad (NRG Corp, s.f.)
 - Funciona en aplicaciones industriales exigentes (NRG Corp, s.f.)
 - El gas de síntesis, después de la limpieza, se quema limpio como el gas natural(NRG Corp, s.f.)

Soporte fotográfico

Figura 9. *The Westinghouse Plasma Gasification*



Fuente. *Tomado de Plasma Gasification Plant Commissioned for Treating Incinerator Ash in China, por Waste to Energy International.*

Nota. Elaboración propia a partir de fuentes bibliográficas

4.6. Barreras y limitaciones para la implementación de metodologías innovadoras en Colombia para el aprovechamiento de residuos.

El desarrollo y aplicación de metodologías innovadoras para el aprovechamiento de residuos se presenta como una solución prometedora para abordar esta problemática. Sin embargo, en el caso específico de Colombia, la adopción de estas metodologías innovadoras se ha visto limitada.

En este apartado, se exploran los criterios que podrían estar influyendo en la falta de utilización de estas metodologías en Colombia, para lo cual se analizan los aspectos como la infraestructura existente, los aspectos regulatorios, las limitaciones técnicas y económicas, así, como los factores sociales y culturales que podrían estar influyendo en la adopción de metodologías innovadoras para el aprovechamiento de residuos en el país.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente se realizó el análisis de contenido de cada uno de los casos de estudio desarrollados en el presente documento, esto con la finalidad de encontrar las barreras o limitaciones para la implementación de tecnologías innovadoras para el aprovechamiento de residuos en Colombia, la identificación de las barreras encontradas tras el análisis de contenido de cada caso de estudio se sintetiza en las tablas 10 a 15, adjuntas a continuación. *Corresponde a elaboración propia:*

Tabla 10. *Análisis de contenido caso de estudio, Biogás Doña Juana*

Barreras o limitaciones identificadas en el caso de estudio	Posibles razones por las cuales las barreras o limitaciones mencionadas podrían aplicarse en el contexto colombiano
Debilidad de infraestructura y capacidad de producción: la planta de biogás, como tecnología es de las más innovadoras en Colombia, sin embargo, la producción es baja y no se cumplen las métricas; en la actualidad se genera energía por 1.7 megavatios, no se ha logrado llegar a los 25 megavatios proyectados.	-Falta de inversión y desarrollo de infraestructuras necesarias para implementar sistemas de gestión de residuos orgánicos a gran escala en todo el país. -Falta de programas educativos y de divulgación que promuevan la importancia del manejo adecuado de los residuos orgánicos. -Regulaciones poco claras y marco normativo insuficiente
Educación y participación limitada: La falta de conciencia y participación de la	-Limitaciones financieras: Escasez de recursos económicos pueden dificultar la implementación de

comunidad en la separación y el compostaje de residuos orgánicos puede limitar la eficacia de los programas.	proyectos de aprovechamiento de residuos orgánicos en todo el territorio colombiano. -Resistencia al cambio y falta de cultura ambiental arraigada en la sociedad colombiana pueden representar un desafío para la implementación de proyectos de aprovechamiento de residuos orgánicos.
--	---

Tabla 11. *Análisis de contenido caso de estudio, Biorgánicos del sur del Huila S.A. E.S.P.*

Barreras o limitaciones identificadas en el caso de estudio	Posibles razones por las cuales las barreras o limitaciones mencionadas podrían aplicarse en el contexto colombiano
Tecnología y procesos limitados: Las plantas de compostaje si bien son una metodología muy utilizada en el país, tienen la limitación en cuanto a su capacidad de escalabilidad y limitación tecnológica.	La falta de instalaciones adecuadas, como plantas de compostaje o rellenos sanitarios, y la escasez de recursos financieros para invertir en infraestructura y tecnologías de tratamiento de residuos pueden limitar la capacidad del país para implementar metodologías innovadoras de aprovechamiento.
Sensibilización y participación comunitaria: La falta de conciencia y participación de la comunidad en la separación y disposición adecuada de los residuos orgánicos puede representar una barrera para el éxito del proceso de compostaje.	La falta de recursos financieros para invertir en tecnologías avanzadas, capacitación del personal y operación y mantenimiento de las instalaciones puede dificultar la adopción de enfoques más eficientes y sostenibles. Superar estas barreras requerirá esfuerzos conjuntos y la implementación de políticas, regulaciones y programas adecuados.

Tabla 12. *Análisis de contenido caso de estudio, Planta Maresme en Barcelona, España.*

Barreras o limitaciones identificadas en el caso de estudio	Posibles razones por las cuales las barreras o limitaciones mencionadas podrían aplicarse en el contexto colombiano
<p>En el caso de estudio de la Planta Maresme en Barcelona, España, se han identificado algunas barreras o limitaciones que han afectado su implementación y funcionamiento.</p>	<p>Aspectos financieros: La inversión necesaria para la construcción y operación de plantas de tratamiento de residuos puede ser un desafío en Colombia.</p>
<p>En el caso de la Planta Maresme, se han presentado conflictos y protestas por parte de algunos residentes y grupos ambientalistas, que expresan preocupaciones sobre los posibles impactos negativos en la salud y el medio ambiente.</p>	<p>La existencia de restricciones y requisitos legales relacionados con la gestión de residuos peligrosos, emisiones y otros aspectos ambientales puede plantear desafíos y requerir inversiones adicionales en cumplimiento y control.</p>
<p>Planificación y permisos: La obtención de los permisos y autorizaciones necesarios para la construcción y operación de la planta puede ser un proceso largo y complejo.</p>	<p>La necesidad de cumplir con los requisitos legales y las evaluaciones de impacto ambiental puede generar demoras en la implementación de proyectos de gestión de residuos, al igual que en el caso de la planta en Barcelona.</p>
<p>En algunos casos, los trámites burocráticos y los requisitos legales pueden retrasar el inicio de las obras y afectar la implementación de la planta.</p>	<p>Resistencia social y conflictos: En Colombia, también puede existir resistencia por parte de la comunidad local cuando se propone la construcción de instalaciones de gestión de residuos.</p>
<p>Aspectos financieros: La inversión requerida para construir y operar una planta de tratamiento de residuos de este tipo puede ser significativa.</p>	<p>Preocupaciones sobre posibles impactos en la salud y el medio ambiente, falta de participación ciudadana en la toma de decisiones y la necesidad de una comunicación efectiva y transparente pueden generar conflictos similares a los observados en el caso de la Planta Maresme.</p>
<p>Normativas y regulaciones: Cumplir con</p>	

las normativas y regulaciones ambientales vigentes es fundamental para la operación de una planta de tratamiento de residuos. A pesar de los desafíos identificados, la Planta Maresme ha logrado operar y contribuir a la gestión sostenible de los residuos en la región de Barcelona.

Tabla 13. *Análisis de contenido caso de estudio, Planta de Shenzhen*

Barreras o limitaciones identificadas en el caso de estudio	Posibles razones por las cuales las barreras o limitaciones mencionadas podrían aplicarse en el contexto colombiano
<p>Costos de inversión: La construcción y operación de una planta de gran envergadura como la de Shenzhen puede requerir una inversión significativa.</p> <p>Aspectos normativos y regulatorios: Cumplir con las regulaciones y normativas ambientales vigentes es fundamental para la operación de una planta de gestión de residuos.</p> <p>La falta de participación comunitaria, la falta de comunicación efectiva y la falta de confianza en el proceso pueden obstaculizar la implementación y operación de la planta.</p> <p>Superar estas barreras y limitaciones requerirá enfoques integrales que involucren la participación y la comunicación efectiva con la comunidad,</p>	<p>En el contexto colombiano, los altos costos asociados con la infraestructura, la tecnología y los equipos especializados pueden ser una barrera para la implementación de proyectos de gestión de residuos similares.</p> <p>La falta de personal capacitado y la disponibilidad limitada de tecnología adecuada pueden ser obstáculos para la implementación y operación eficiente de plantas de gestión de residuos en Colombia.</p> <p>Los requisitos legales relacionados con emisiones, tratamiento de residuos peligrosos y otros aspectos ambientales pueden ser complejos y requerir inversiones adicionales para garantizar el cumplimiento, al igual que en el caso de la Planta de Shenzhen.</p> <p>Resistencia y preocupaciones ambientales: En Colombia, también puede existir resistencia por parte</p>

una planificación adecuada, la movilización de recursos financieros, la adquisición de tecnología adecuada y el cumplimiento estricto de las regulaciones ambientales.

Además, se debe fomentar una mayor conciencia y educación sobre la importancia de la gestión adecuada de residuos y los beneficios que pueden derivarse de proyectos como la Planta de Shenzhen.

de la comunidad local cuando se propone la construcción de plantas de gestión de residuos.

En el contexto colombiano, la falta de participación comunitaria, la falta de comunicación efectiva y la falta de confianza en el proceso pueden ser barreras para la implementación exitosa de plantas de gestión de residuos similares.

Tabla 14. *Análisis de contenido caso de estudio, Planta de tratamiento de residuos de Milá (Menorca)*

Barreras o limitaciones identificadas en el caso de estudio	Posibles razones por las cuales las barreras o limitaciones mencionadas podrían aplicarse en el contexto colombiano
<p>En el caso de estudio de la Planta de Tratamiento de Residuos de Milá en Menorca, se identificaron algunas barreras o limitaciones que pueden afectar su funcionamiento.</p> <p>Estas barreras incluyen:</p> <p>Capacidad limitada: Aunque la planta de tratamiento de residuos de Milá tiene una capacidad de procesamiento de 50.000 toneladas anuales de envases ligeros, esta capacidad puede ser insuficiente para hacer frente a la cantidad total de residuos</p>	<p>Capacidad limitada: Colombia enfrenta desafíos significativos en términos de gestión de residuos, especialmente en áreas urbanas densamente pobladas.</p> <p>La capacidad limitada de las plantas de tratamiento de residuos en Colombia puede ser una barrera similar a la identificada en el caso de Milá.</p> <p>Espacio y logística: La disponibilidad de espacio adecuado para la ubicación de plantas de tratamiento de residuos puede ser un desafío en Colombia, especialmente en áreas urbanas donde el espacio es limitado.</p>

<p>generados en la isla de Menorca.</p> <p>Espacio y logística: La disponibilidad de espacio puede ser un desafío, ya que la planta necesita áreas adecuadas para el almacenamiento y tratamiento de los diferentes tipos de residuos.</p> <p>Además, la logística de transporte de los residuos desde diferentes puntos de la isla hasta la planta puede requerir una infraestructura de transporte eficiente y costosa.</p> <p>La obtención de los fondos necesarios para financiar el proyecto puede ser una barrera importante.</p> <p>Regulaciones y permisos: La obtención de los permisos y licencias necesarios para la construcción y operación de una planta de tratamiento de residuos puede ser un proceso complejo y demorado.</p>	<p>Además, la logística de transporte de residuos desde diferentes ubicaciones hasta las plantas de tratamiento puede requerir una planificación cuidadosa y una infraestructura de transporte eficiente, especialmente en un país con una geografía diversa y grandes distancias entre áreas urbanas y rurales.</p> <p>El acceso a financiamiento adecuado y sostenible puede ser un desafío para desarrollar y mantener la infraestructura necesaria para una gestión efectiva de los residuos en el país.</p> <p>La falta de conciencia y educación ambiental, así como la resistencia al cambio, pueden dificultar la implementación exitosa de proyectos de gestión de residuos.</p> <p>Es esencial promover la inversión en infraestructura, fortalecer la educación y la conciencia ambiental, fomentar la participación ciudadana y mejorar los marcos regulatorios para avanzar hacia una gestión más eficiente y sostenible de los residuos en Colombia.</p>
---	--

Tabla 15. *Análisis de contenido caso de estudio, Planta The Westinghouse Plasma Gasification*

Barreras o limitaciones identificadas en el caso de estudio	Posibles razones por las cuales las barreras o limitaciones mencionadas podrían aplicarse en el contexto colombiano
--	--

Costos iniciales elevados: La implementación de la tecnología de gasificación por plasma requiere una inversión inicial significativa.

Los altos costos de construcción y puesta en marcha de la planta pueden representar una barrera para su adopción en otros lugares.

Disponibilidad limitada en cuanto a instalaciones.

Requerimientos regulatorios y permisos: La implementación de una planta de gasificación por plasma puede requerir cumplir con una serie de regulaciones y obtener los permisos necesarios de las autoridades locales y ambientales.

El proceso de obtener las aprobaciones regulatorias puede ser complejo y prolongado, lo que representa una barrera para su implementación en algunos lugares.

Estas barreras y limitaciones identificadas en el caso de estudio de The Westinghouse Plasma Gasification pueden influir en la adopción y aplicación de esta tecnología en otros contextos.

Costos iniciales elevados: Colombia, al igual que muchos otros países, puede enfrentar desafíos económicos al invertir en tecnologías avanzadas como la gasificación por plasma.

Los altos costos de construcción, adquisición de equipos y capacitación especializada pueden representar una barrera debido a las limitaciones presupuestarias y la asignación de recursos limitados para el manejo de residuos.

Es posible que Colombia no cuente con la infraestructura adecuada o experimente dificultades para adquirir y mantener dichos sistemas debido a limitaciones técnicas o falta de experiencia en este campo.

Si la cantidad o calidad de los residuos no es suficiente para alimentar de manera constante la planta de gasificación por plasma, su implementación podría ser limitada.

Requerimientos regulatorios y permisos: Colombia cuenta con regulaciones y procesos de permisos específicos para el manejo de residuos y la implementación de nuevas tecnologías.

La falta de claridad en los marcos regulatorios o la necesidad de actualizarlos para abordar tecnologías emergentes como la gasificación por plasma podría generar barreras adicionales.

4.7. Selección de las metodologías innovadoras de mejor aplicabilidad para el aprovechamiento de residuos en Colombia, implementando el método de matriz multicriterio

A continuación, se procederá con la metodología de selección mediante una matriz multicriterio con la cual se busca comparar y evaluar las cinco metodologías para el aprovechamiento de residuos identificadas y mencionadas previamente en este documento, con la finalidad de determinar las metodologías de mejor aplicabilidad en Colombia.

4.7.1. Identificación de los criterios

El primer paso en el proceso de selección mediante la matriz multicriterio es la identificación de los criterios con los cuales se evaluarán las diferentes metodologías de aprovechamiento de residuos, los criterios que se establecieron para el presente estudio se describen enseguida:

Funcionamiento: Con este criterio se busca evaluar la efectividad y eficiencia del funcionamiento de la metodología, considerando la viabilidad de su implementación en el contexto de la gestión de residuos sólidos en Colombia.

Tipos de residuos que aprovechan: Este criterio evalúa los tipos de residuos que son aprovechados por las diferentes metodologías, considerando si abarca una amplia gama de residuos o se limita a ciertos tipos específicos, adicionalmente permite relacionar los tipos de residuos que aprovecha la tecnología con el potencial de residuos con el que cuenta el país.

Capacidad de aprovechamiento: La finalidad de este criterio es evaluar la capacidad de la metodología para aprovechar los residuos sólidos, considerando la cantidad y calidad de los materiales recuperados o procesados, permitiendo también evaluar la pertinencia de escalabilidad de los procesos de aprovechamiento.

Disponibilidad de espacio: Este criterio evalúa la necesidad de espacio físico requerido para la implementación de la metodología, considerando la disponibilidad de espacio en el contexto de gestión de residuos sólidos en Colombia.

Viabilidad económica: Este criterio permite evaluar la viabilidad económica de la metodología, considerando los costos asociados a su implementación, operación y mantenimiento, así como los beneficios económicos generados por la misma.

Impacto ambiental: Este criterio evalúa el impacto ambiental de la metodología, considerando su contribución a la reducción de la contaminación y la promoción de prácticas sostenibles en la gestión de residuos sólidos.

4.7.2. Identificación de alternativas

Las alternativas de metodologías de aprovechamiento de residuos que serán evaluadas con base en los criterios anteriormente establecidos corresponden a las plantas de biogás, las plantas de compostaje, las plantas de tratamiento mecánico biológico, las plantas de gasificación por plasma y las plantas de termovalorización, estas alternativas han sido previamente especificadas y descritas a partir de la revisión de fuentes bibliográficas en el presente documento en las secciones de metodologías de aprovechamiento de residuos en Colombia y metodologías innovadoras de aprovechamiento de residuos a nivel internacional.

4.7.3. Construcción de la matriz multicriterio

A continuación, se describen los pasos que se tuvieron en cuenta para la construcción de la matriz, luego de tener ya establecidos los criterios y las alternativas:

Asignación de los pesos

Se asignaron los pesos a cada criterio para reflejar su importancia relativa en la toma de decisiones, esta asignación se realizó con base en la investigación realizada durante el curso del desarrollo del presente estudio, los pesos se establecieron de la siguiente manera;

- Funcionamiento: Peso de 0.2 (20%)
- Tipos de residuos que aprovecha: Peso de 0.1 (10%)
- Capacidad de aprovechamiento: Peso de 0.3 (30%)
- Disponibilidad de espacio: Peso de 0.1 (10%)
- Viabilidad económica: Peso de 0.2 (20%)
- Impacto ambiental: Peso de 0.1 (10%)

Cabe resaltar que el criterio que mayor peso tiene es la capacidad de aprovechamiento ya que lo que se busca con este estudio es identificar las metodologías de mejor aplicabilidad para el país, pero que a su vez puedan ser metodologías con una proyección importante de escalabilidad.

Determinación de la escala de desempeño para indicar el nivel de cumplimiento de cada criterio por parte de las alternativas

La escala de desempeño se refiere a la medida o evaluación del rendimiento de cada opción o alternativa en relación con los diferentes criterios establecidos. El desempeño indica cómo cada opción se desempeña o se ajusta en cada uno de los criterios considerados en la matriz. La calificación del desempeño se realiza asignando valores a cada opción en función de cómo se compara con los criterios establecidos, la escala de puntuación establecida para este estudio fue: de 1 a 10, donde 1 indica un bajo desempeño, 5 indica un desempeño medio y 10 indica un alto desempeño.

Luego de establecidos los criterios, las alternativas, la asignación de pesos y la escala de desempeño se procedió con la realización de la matriz, esto con la finalidad de obtener la puntuación ponderada para cada alternativa y de esta manera poder determinar las metodologías de mayor aplicabilidad en Colombia, en la tabla a continuación se evidencia el resultado de la matriz realizada.

Tabla 16. Matriz Multicriterio para la Selección de las Metodologías Innovadoras de mejor Aplicabilidad para el Aprovechamiento de Residuos en Colombia

Tecnologías		Funcionamiento	Tipos de residuo que aprovecha	Capacidad de aprovechamiento	Disponibilidad de espacio	Viabilidad económica	Impacto ambiental	Puntuación Total
Plantas de biogás	PESO	0,2	0,1	0,3	0,1	0,2	0,1	8
	Desempeño (1-10)	5	10	10	10	5	10	
	Sub total	1	1	3	1	1	1	
Plantas de compostaje	PESO	0,2	0,1	0,3	0,1	0,2	0,1	6
	Desempeño (1-10)	5	5	5	10	5	10	
	Sub total	1	0,5	1,5	1	1	1	
Plantas de tratamiento mecánico biológico	PESO	0,2	0,1	0,3	0,1	0,2	0,1	9
	Desempeño (1-10)	10	10	10	10	5	10	
	Sub total	2	1	3	1	1	1	
Plantas de gasificación por plasma	PESO	0,2	0,1	0,3	0,1	0,2	0,1	7,2
	Desempeño (1-10)	5	10	10	10	1	10	
	Sub total	1	1	3	1	0,2	1	
Plantas de termovalorización	PESO	0,2	0,1	0,3	0,1	0,2	0,1	9
	Desempeño (1-10)	10	10	10	10	5	10	
	Sub total	2	1	3	1	1	1	

4.7.4. Análisis y comparación de las alternativas con el resultado de la matriz multicriterio

El análisis de la matriz multicriterio en el presente estudio proporciona una evaluación comparativa de las alternativas de aprovechamiento de residuos previamente definidas, al ser medidas utilizando los criterios también predefinidos anteriormente. A continuación, se presenta el análisis por alternativa, de la matriz multicriterio realizada.

Plantas de Biogás: Esta tecnología muestra un desempeño promedio en la mayoría de los criterios evaluados. Su fortaleza radica en la capacidad de aprovechamiento y tipos de residuos que aprovecha, lo que indica que es una opción eficiente para convertir residuos orgánicos en biogás. Sin embargo, la viabilidad económica puede representar una posible limitación para su implementación.

Plantas de Compostaje: El compostaje obtiene la calificación más baja en comparación con las demás alternativas. Su desempeño es moderado en todos los criterios, sin destacar en ningún aspecto particular. Esto sugiere que el compostaje puede ser una opción viable para el aprovechamiento de residuos orgánicos, pero no ofrece un alto rendimiento en términos de capacidad de aprovechamiento y viabilidad económica.

Plantas de Tratamiento Mecánico Biológico: Esta tecnología muestra un desempeño sólido en todos los criterios evaluados. Tiene un alto desempeño en los criterios de funcionamiento, tipos de residuos que aprovecha y capacidad de aprovechamiento, su debilidad radica en los costos de inversión. Esto indica que las plantas de tratamiento mecánico biológico son altamente efectivas en la gestión de residuos sólidos, ofreciendo un alto rendimiento en la mayoría de los aspectos evaluados, pero para su implementación se requerirá de grandes inversiones de los sectores público o privado del país.

Plantas de Gasificación por Plasma: La gasificación por plasma obtiene una puntuación moderada en la mayoría de los criterios, exceptuando en funcionamiento y viabilidad económica., destaca en el tipo de residuos que aprovecha y su capacidad de aprovechamiento, lo

que indica su potencial para tratar una amplia gama de residuos. Sin embargo, la debilidad de este tipo de tecnología radica en los costos de inversión y requisitos de infraestructura requerida.

Plantas de Termovalorización: La termovalorización muestra un desempeño sólido en la mayoría de los criterios evaluados. Su comportamiento en cuanto al funcionamiento, tipos de residuos que aprovecha y capacidad de aprovechamiento destaca ante las demás tecnologías, en este caso al igual que en las plantas de tratamiento mecánico biológico su debilidad está en los costos de inversión. Esto indica que las plantas de termovalorización son una opción efectiva para la gestión de residuos, que requerirán de un esfuerzo económico para su implementación.

En general, el análisis de la matriz multicriterio sugiere que las plantas de tratamiento mecánico biológico y las plantas de termovalorización son las opciones más viables y eficientes para la gestión de residuos sólidos en Colombia, en términos de los criterios evaluados. Sin embargo, es importante considerar las condiciones y requisitos específicos del contexto local antes de tomar una decisión final sobre la tecnología a implementar.

CONCLUSIONES

Con base en la caracterización nacional de residuos sólidos dispuestos en rellenos sanitarios en Colombia, se puede concluir que el país tiene un gran potencial de aprovechamiento para la generación de valor en el campo de los residuos orgánicos ya que estos representan más del 60% de los residuos que son dispuestos, sin embargo no se cuenta con datos sobre la cantidad de residuos aprovechados mediante las diferentes metodologías disponibles, como si se cuenta con los datos sobre la disposición final de residuos, de donde se puede inferir que actualmente en el país no se tiene estructurada una adecuada gestión de residuos que se enfoque en el aprovechamiento de los mismos, esta afirmación es respaldada por los datos registrados en el informe de disposición final en donde se evidencia que aproximadamente el 97% de los residuos generados son dispuestos en rellenos sanitarios, modelo que es insostenible no solo por la vida útil de estas instalaciones, si no por el gran impacto ambiental que estas generan y el desaprovechamiento del potencial energético a causa de la disposición final.

Tras el análisis del informe de diagnóstico y evaluación del tratamiento de residuos sólidos en Colombia, el cual se realizó para una muestra de visitas a 13 plantas a nivel nacional, se puede concluir que las iniciativas de tratamiento de residuos en el país se enfocan en el aprovechamiento de residuos orgánicos mediante las plantas de compostaje y biogás, siendo el compostaje la tecnología de mayor desarrollo e implementación en el país, esto debido a los bajos costos de inversión en comparación con otras tecnologías como lo es por ejemplo las plantas de tratamiento mecánico biológico o las plantas de termovalorización.

Si bien el país está enfocado en el aprovechamiento de residuos orgánicos, este no se ha realizado efectivamente ya que el sistema actual está orientado a la producción de compostaje y no a la valorización energética de los residuos, lo cual se traduce en falta de proyectos de inversión público-privado encaminados a la generación de valor mediante tecnologías que aporten al cambio para incursionar en la economía circular en busca de la sostenibilidad económica, ambiental y social.

A nivel internacional se encuentran diversas tecnologías para el aprovechamiento de residuos que aún no se encuentran en Colombia, pero se pueden identificar 3 metodologías innovadoras con mayor aplicabilidad en el mundo, estas son: Termovalorización, Tratamiento Mecánico-Biológico y Gasificación por Plasma. Estas tecnologías minimizan el impacto ambiental y cuentan con el funcionamiento adecuado para ayudar al medio ambiente de una forma favorable. A partir de lo anteriormente mencionado y realizando una investigación profunda, se puede inferir que la metodología mayor utilizada a nivel internacional es la termovalorización por su funcionamiento, desempeño y viabilidad técnica. A pesar de ser una tecnología altamente costosa, es la más adecuada para disminuir el impacto ambiental.

Del análisis de las barreras y limitaciones para la implementación de metodologías innovadoras para el aprovechamiento de residuos en Colombia, se puede concluir que la razón por la cual en el país aún prevalece el uso de rellenos sanitarios como método principal de disposición final de residuos puede atribuirse a diversos factores como lo son; la infraestructura y recursos limitados, ya que implementar nuevas tecnologías de aprovechamiento de residuos requiere una infraestructura adecuada y recursos financieros significativos, por otro lado, las regulaciones y políticas gubernamentales también desempeñan un papel crucial en la promoción de tecnologías de aprovechamiento de residuos, en algunos países, se han establecido normativas y metas específicas para el manejo de residuos, lo que ha incentivado la adopción de metodologías más sostenibles. Dentro de estos factores también se puede mencionar la falta de conciencia y educación sobre las alternativas disponibles para la gestión de residuos, estas pueden ser un factor clave que limite la adopción de tecnologías innovadoras, la sensibilización y la educación pública son fundamentales para fomentar cambios en los hábitos de consumo y promover prácticas de gestión de residuos más sostenibles, para de esta manera atacar el problema desde la fuente.

Es importante destacar que en Colombia se están realizando esfuerzos para implementar metodologías innovadoras en el manejo de residuos. Por ejemplo, se han promovido proyectos de plantas de tratamiento mecánico biológico, plantas de biogás y plantas de termovalorización en algunas ciudades del país. Sin embargo, la adopción de estas tecnologías puede llevar tiempo debido a los desafíos mencionados anteriormente, cabe mencionar que para que estos proyectos

se puedan llevar a cabo es fundamental que las autoridades, la sociedad civil y el sector privado trabajen de manera conjunta para impulsar la transición hacia metodologías más sostenibles en el manejo de residuos en Colombia. Esto implicaría invertir en infraestructura adecuada, desarrollar regulaciones y políticas efectivas, así como fomentar la conciencia y educación ambiental para promover cambios de comportamiento en la sociedad.

El resultado de la matriz multicriterio arroja como metodologías de aprovechamiento de residuos de mejor aplicabilidad en Colombia a las plantas de tratamiento mecánico biológico y las plantas de termovalorización, seguidas de las plantas de biogás, plantas de gasificación por plasma y por ultimo las plantas de compostaje, estos resultados se traducen en que el aprovechamiento de residuos en el país debería estar enfocado más en el aprovechamiento energético de los residuos para la generación de energía eléctrica y no en la producción de compostaje, ni mucho menos en la disposición final en rellenos sanitarios.

REFERENCIAS

- Acosta, L et al. (2005). La digestión anaerobia aspectos teóricos parte I. Revista Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar 81), 35-48.
- Africano, M. (2021). ¿Sabías que en Doña Juana se aprovechan los gases de los residuos orgánicos? <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/habitat/planta-de-biogas-dona-juana-en-bogota>
- Alcaldía de Bogotá, s.f. Biogás Doña Juana gana el Premio de Eficiencia Energética de Andesco. <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/habitat/biogas-dona-juana-gana-el-premio-de-eficiencia-energetica>
- Bahada Tata, P., Kaza,S., Van Woerden, F., Yaolisa. C. (2018). What a waste 2.0: Una instantánea global de la gestión de residuos sólidos hasta el 2050. <https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/>
- Banco Mundial. (2018). Los desechos: un análisis actualizado del futuro de la gestión de los desechos sólidos. <https://www.bancomundial.org/es/news/immersive-story/2018/09/20/what-a-waste-an-updated-look-into-the-future-of-solid-waste-management>
- Banco Mundial. (2018). Los desechos 2.0: Un panorama mundial de la gestión de desechos sólidos hasta 2050. <https://www.bancomundial.org/es/news/infographic/2018/09/20/what-a-waste-20-a-global-snapshot-of-solid-waste-management-to-2050>
- Banco Mundial et al. (2021). Tratamiento de residuos sólidos en el marco del servicio público de aseo. https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/20210830-reporte-final-wb_v3_0.pdf
- Biogás Colombia. (s.f). Mejor aire para Bogotá, energía limpia para el mundo. <https://www.biogas.com.co/>
- Bleda Quilez, S. (2017). Estudio de alternativas de tratamiento y eliminación de residuos sólidos urbanos. Aplicación a un plan zonal de gestión de la Comunidad Valenciana. https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/89631/01_Memoria.pdf?sequence=1
- Breukers, L. y Puentes F. (2021). Tratamiento de residuos sólidos en el marco del servicio público. https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/20210806-entregable-1-v5-definitiva_0.pdf

- Buentello Montoya, D. y Duarte Ruiz, C. (2020). Análisis de la gasificación y reformado de alquitrán con carbón y vapor generado in-situ.
<http://rmiq.org/ojs311/index.php/rmiq/article/view/1724/1055>
- Bohórquez Santana, Wilson. (2019). El proceso de compostaje. Libros en acceso abierto. 72.
<https://ciencia.lasalle.edu.co/libros/72>
- Cámara Oviedo, (2010). Viabilidad económica de un proyecto.
<https://www.mba-asturias.com/empresas/viabilidad-economica-proyecto-empresarial/#:~:text=La%20viabilidad%20econ%C3%B3mica%20determina%20el,el%20retorn%20de%20la%20inversi%C3%B3n>
- Cepal, (2016). Guía general para la gestión de residuos sólidos domiciliarios.
https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/40407/1/S1500804_es.pdf
- Cepal, (2022). Convenio de Rotterdam Para la Aplicación del Procedimiento de Consentimiento Fundamentado Previo a Ciertos Plaguicidas y Productos Químicos Peligrosos Objeto de Comercio Internacional y de Basilea <https://observatoriop10.cepal.org/es/tratados/convenio-rotterdam-la-aplicacion-procedimiento-consentimiento-fundamentado-previo-ciertos>
- CONPES, (2016). Política nacional para la gestión integral de residuos sólidos.
<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3874.pdf>
- Decreto 1713 de 2002. Por el cual se reglamenta la Ley 142 de 1994, la Ley 632 de 2000 y la Ley 689 de 2001, en relación con la prestación del servicio público de aseo, y el Decreto Ley 2811 de 1974 y la Ley 99 de 1993 en relación con la Gestión Integral de Residuos Sólidos.
https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=5542
- Departamento nacional de planeación. (2015). Rellenos sanitarios de 321 municipios colapsarán en cinco años, advierte el DNP. <https://www.dnp.gov.co/Paginas/Rellenos-sanitarios-de-321-municipios-colapsar%C3%A1n-en-cinco-a%C3%B1os,-advierte-el-DNP.aspx#:~:text=%22Se%20estima%20que%20en%20los,aprovechamiento%20de%>
- Durán, M. M. (2014). El estudio de caso en la investigación cualitativa. Revista Nacional De Administración, 3(1), 121–134. <https://doi.org/10.22458/rna.v3i1.477>
- EcoInventos, (2022). Suecia recicla un asombroso 99 % de su basura.
<https://ecoinventos.com/suecia-recicla-un-asombroso-99-de-su-basura/>

- Ecología, (2018). El Proceso de Termovalorización, una Solución Tangible al Problema Mundial de la Basura. <https://petroquimex.com/el-proceso-de-termovalorizacion-una-solucion-tangible-al-problema-mundial-de-la-basura/>
- Edo Alcón, N. (2019). Diseño de una metodología para el control de calidad de los rechazos producidos en las platas de tratamiento mecánico-biológico de residuos sólidos urbanos. [tesis de doctorado, Universitat Jaume I].
https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/668136/2019_Tesis_Edo%20Alcon_Natalia.pdf?sequence=1
- Fernandez, A. (2017). 8 tecnologías para mejorar el reciclaje. <https://www.consumer.es/medio-ambiente/8-tecnologias-para-mejorar-el-reciclaje.html>
- Fernández Bustillo et al., (2008). Diseño de una herramienta de evaluación multicriterio. [tesis de pregrado, Universidad Politécnica de Madrid].
https://oa.upm.es/7304/1/PFC_ANA_FERNADEZ_BUSTILLO.pdf
- Florez Lopez, Carlos (2014). Modelo de aprovechamiento sostenible de los residuos sólidos no peligrosos generados en la universidad de la costa CUC. [tesis de pregrado, Universidad de la Costa CUC].
<https://repositorio.cuc.edu.co/bitstream/handle/11323/479/15047545.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Fuentelba, J. (2018). Plan de negocio planta de tratamiento mecánico biológico de residuos sólidos urbanos. <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/159330/Plan-de-negocio-planta-de-tratamiento-mec%C3%A1nico-biol%C3%B3gico-de-residuos-s%C3%B3lidos-urbanos.pdf?sequence=1>
- GTA Ambiental. (2022). ¿Qué es la termovalorización de residuos? <https://gtaambiental.com/que-es-la-termovalorizacion-de-residuos/>
- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, P. (2014). Metodología de la investigación. México: McGraw-Hill Interamericana.
- Hernández, R. y Mendoza, C. (2018). Metodología de la investigación, las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. McGraw-Hill Education.
- ICAG, (2022). Decreto 596 de 2016 <https://www.igac.gov.co/es/contenido/decreto-596-de-2016#:~:text=Descripci%C3%B3n%20de%20otras%20disposiciones>

INERCO, (2018). Valorización energética de residuos: Proyecto WTE Colombia.

https://bdigital.upme.gov.co/bitstream/handle/001/1339/Productos%201,2%20y%203_V2.pdf;jsessionid=799422832D1857F8FB5ED1F1CFFCCC08?sequence=5

Innovación Digital 360. (2022). Análisis de datos: Concepto, metodología y técnicas.

<https://www.innovaciondigital360.com/big-data/analisis-de-datos-tecnicas-y-metodologias-para-la-aplicacion-de-analytics/>

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía [IDAE], 2007. Biomasa: Digestores anaerobios.

https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones_idae/documentos_10737_biomasa_digestores_anaerobios_a2007_0d62926d.pdf

Interempresas. (2022). Inaugurada la nueva planta de tratamiento de residuos de Milà (Menorca).

[https://www.interempresas.net/Reciclaje/Articulos/456809-Inaugurada-la-nueva-planta-de-tratamiento-de-residuos-de-Mila-\(Menorca\).html](https://www.interempresas.net/Reciclaje/Articulos/456809-Inaugurada-la-nueva-planta-de-tratamiento-de-residuos-de-Mila-(Menorca).html)

Ley 142 de 1994. Principios generales.

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=2752>

Ley 99 de 1993. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/08/ley-99-1993.pdf>

Lima Morra, R. y Floretin Lopez, C, (2019). Libro de actas. VIII Simposio Iberoamericano en Ingeniería de Residuos. Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción. Asunción, Paraguay pp.897. ISBN: 978-99967-670-2-9

Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, (2022). Hoy no se habla de basura, sino de residuos que son insumos para productos: Minambiente. <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/hoy-no-se-habla-de-basura-sino-de-residuos-que-son-insumos-para-productos-minambiente/#:~:text=Bogot%C3%A1%20D.%20C.%2C%2017%20de%20mayo%20de%202022%20%2DMADS%2D.&text=La%20cifra%20m%C3%A1s%20reciente%20entregada,0.89%20%25%20respecto%20al%20a%C3%B1o%202019>

Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, (2022). Hoy no se habla de basura, sino de residuos que son insumos para productos: Minambiente. <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/hoy-no-se-habla-de-basura-sino-de-residuos-que-son-insumos-para-productos-minambiente/#:~:text=Bogot%C3%A1%20D.%20C.%2C%2017%20de%20mayo%20de%202022%20%2DMADS%2D.&text=La%20cifra%20m%C3%A1s%20reciente%20entregada,0.89%20%25%20respecto%20al%20a%C3%B1o%202019>

Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, (2022). Tratados internacionales: Minambiente.

<https://www.minambiente.gov.co/asuntos-internacionales/tratados-internacionales/>

Ministerio de Comercio, Industria y Turismo (MINCIT).

<https://www.mincit.gov.co/getattachment/c957c5b4-4f22-4a75-be4d-73e7b64e4736/17-10-2018-Uso-Eficiente-de-Recursos-Agua-y-Energi.aspx>

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico [MITECO], s.f. Gasificación por plasma <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/domesticos/gestion/sistema-tratamiento/Gasificacion-por-plasma.aspx>

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico [MITECO], s.f. Tratamientos mecánico-biológicos [https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/domesticos/gestion/sistema-tratamiento/Tratamientos-mecanico-biologicos.aspx#:~:text=Los%20tratamiento%20mec%C3%A1nico%2Dbiol%C3%B3gico%2C%20TMB,seca%20\(fracci%C3%B3n%20resto%20y%20envases](https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/domesticos/gestion/sistema-tratamiento/Tratamientos-mecanico-biologicos.aspx#:~:text=Los%20tratamiento%20mec%C3%A1nico%2Dbiol%C3%B3gico%2C%20TMB,seca%20(fracci%C3%B3n%20resto%20y%20envases)

Muñoz Bolaños, G. (2018). Revisión de la gasificación por plasma, una tecnología para reutilizar y producir.

<https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/17917/Mu%C3%B1ozBola%C3%B1osEgnerGiovanny2018.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

NRG Corp. (s.f). Clean, sustainable energy recovery through plasma gasification.

https://d3pcsg2wj9izr.cloudfront.net/files/41035/download/449710/ANRG_Energy-Evolved_Brochure.pdf

Objetivos de desarrollo sostenible, (2015).

[https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/;](https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/)

Organización de las naciones unidas, (2022). Energía <https://www.un.org/es/actnow/facts-and-figures#:~:text=Solo%20se%20ha%20reciclado%20un,o%20en%20el%20medio%20ambiente>

Organización de las naciones unidas, (2007). Convenio sobre la Diversidad Biológica, instrumento internacional clave para un desarrollo sostenible

<https://www.un.org/es/observances/biodiversityday/convention#:~:text=El%20Convenio%20sobre%20la%20Diversidad,ha%20sido%20ratificado%20por%20196>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2013). Manual de compostaje del agricultor. <https://www.fao.org/3/i3388s/i3388s.pdf>

Reciclaje, (2022).

<https://www.eda.admin.ch/aboutswitzerland/es/home/umwelt/natur/recycling.html>

Residuos Profesional. (2016). China construye la mayor planta de valorización de residuos del mundo. <https://www.residuosprofesional.com/china-mayor-planta-valorizacion-residuos/>

- Rivas, C. (2021). Piensa un minuto antes de hablar: Gestión integral de residuos solidos
<https://www.mincit.gov.co/getattachment/c957c5b4-4f22-4a75-be4d-73e7b64e4736/17-10-2018-Uso-Eficiente-de-Recursos-Agua-y-Energi.aspx>
- Rivera, Y. (2022). Bogotá tendrá la primera planta de Colombia que convertirá residuos en energía
<https://bogota.gov.co/mi-ciudad/habitat/bogota-planta-de-termovalorizacion-que-convertira-basura-en-energia>
- Roberto, A (2018). Sistemas de termovalorización en Europa.
<https://www.sustentartv.com/sistemas-de-termovalorizacion-en-europa/#>
- Saavedra Jara, D.A. (2018). Modelo de negocio para el pretratamiento mecánico biológico de residuos sólidos domiciliarios en Chile y evaluación de su aplicación en un caso tipo. [tesis de maestría, Universidad de Chile].
[https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/151260/Modelo-de-negocio-para-el-pretratamiento-mec% c3% a1 nico-biologico-de-residuos-solidos-domiciliarios-en-Chile.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/151260/Modelo-de-negocio-para-el-pretratamiento-mec%c3%a1nico-biologico-de-residuos-solidos-domiciliarios-en-Chile.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Sacry Servicios, s.f. Centro de Valorización de Residuos del Maresme.
<https://www.sacryservicios.com/-/ampliacion-adecuacion-y-explotacion-del-centro-integral-de-valorizacion-de-residuos-del-maresme>
- SSPD. (2019). Informe de Seguimiento a Sitios de Disposición Final.
https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inlinefiles/biorganicos_del_sur_del_huila_s.a.e.s.p..pdf
- Stsepanets, A. (2021). Alcance de un proyecto. <https://blog.ganttpro.com/es/alcance-del-proyecto/#que-es-alcance-de-un-proyecto>
- Superintendencia de Servicios públicos domiciliarios Colombia. (2022). Informe nacional de disposición final de residuos sólidos 2020.
https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inlinefiles/informe_df_2020%20%281%29.pdf
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios Colombia. (2023). Informe nacional de disposición final de residuos sólidos 2021.
- SWH Group, s.f. Gasificación por plasma la producción de energía en el siglo 21.
<https://www.swhgroup.eu/sp-plazmove-zplynovani.html>

Technology needs assessment, (2022). Technology fact sheet. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.ctc-n.org/sites/www.ctc-n.org/files/UNFCCC_docs/ref15x06_35.pdf

UAESP. (2022). La UAESP recibió 2.475 millones de pesos por parte de Biogás Colombia. <https://www.uaesp.gov.co/noticias/la-uaesp-recibio-2475-millones-pesos-parte-biogas-colombia>

Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos (UAESP), (2014). Guía técnica para el aprovechamiento de residuos orgánicos a través de metodologías de compostaje y lombricultura. https://www.uaesp.gov.co/images/Guia-UAESP_SR.pdf

Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos (UAESP), s.f. ¿Qué es el relleno sanitario doña Juana? <https://www.uaesp.gov.co/especiales/relleno/#services>

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). http://www.upme.gov.co/guia_ambiental/carbon/gestion/guias/plantas/contenid/medidas3.htm

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), (2018). Valoración energética de residuos: Proyecto WTE Colombia. https://bdigital.upme.gov.co/bitstream/handle/001/1339/Productos%201,2%20y%203_V2.pdf;jsessionid=C179E819B0BE5F80530D285DC7C06F44?sequence=5

Valor compartido, (2019). Lo que México puede aprender de Europa en gestión de residuos. <https://valor-compartido.com/lo-que-mexico-puede-aprender-de-europa-en-gestion-de-residuos/>

Veolia (2015). Tratamiento de residuos sólidos urbanos del Maresme, centro integral de valorización de residuos. <https://www.veolia.com/latamib/es/casos-estudio/centro-integral-valorizacion-residuos-maresmehttps://www.residuosprofesional.com/plantas-valorizacion-energetica-2015/>

Waste to Energy International. (s.f). Plasma Gasification Plant Commissioned for Treating Incinerator Ash in China. <https://wteinternational.com/news/plasma-gasification-plant-commissioned-for-treating-incinerator-ash-in-china/>