



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

**Metodología para evaluar la  
implementación de proyectos de  
generación de energía a base de  
Residuos Sólidos Municipales (RSM)  
en municipios colombianos.  
Aplicación caso municipio de  
Soacha**

**Juan José Becerra Florez**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ciencias Económicas, Escuela de Administración y Contaduría Pública  
Bogotá D.C., Colombia

2023



# **Metodología para evaluar la implementación de proyectos de generación de energía a base de Residuos Sólidos Municipales (RSM) en municipios colombianos. Aplicación caso municipio de Soacha**

**Juan José Becerra Florez**

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Administración**

Director:

Magister Nelson de Jesús González Hoyos

Línea de Investigación:

Gestión de Operaciones e Innovación Tecnológica

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Económicas, Escuela de Administración y Contaduría Pública

Bogotá D.C., Colombia

2023



*A Diana, Aleja y Sebas, quienes son el motor  
de mi vida.*

*A mi madre, que siempre ha estado y esta.*



## Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



---

Juan José Becerra Flórez

01/08/2023



## Resumen

### **Metodología para evaluar la implementación de proyectos de generación de energía a base de Residuos Sólidos Municipales (RSM) en municipios colombianos. Aplicación caso municipio de Soacha**

Este trabajo desarrolla y presenta una herramienta para evaluar la implementación de proyectos de generación de energía con base en residuos sólidos (Waste to Energy – WtE) en municipios colombianos. Se realizó la exploración de investigaciones y/o trabajos realizados sobre el particular para evidenciar posibles metodologías existentes para esta evaluación, también se analizaron las posibles tecnologías WtE existentes y las condiciones necesarias para su implementación. Posteriormente se analizaron los factores o parámetros que incidirán en la posible definición de la viabilidad o no de la implementación de tecnologías WtE. Finalmente se aplicó la metodología elaborada en el municipio de Soacha, Cundinamarca para evaluar la viabilidad de 4 tecnologías WtE, incineración, co-procesamiento, Digestión anaeróbica, captura de gas en rellenos sanitarios y Pirolisis/Gasificación; obteniendo como resultado que ninguna de ellas es viable para desarrollar en Soacha. Se concluyó que se logró realizar un desarrollo sistemático para la evaluación de este tipo de proyectos pero que depende en gran medida de la idoneidad del evaluador o equipo evaluador y que este cuente con información acertada y suficiente para lograr una evaluación que sirva de herramienta para quienes toman las decisiones en cuanto a las política y ejecución de la gestión de RSM.

***Palabras clave:* (Waste to Energy, Gestión de residuos sólidos, viabilidad, metodología).**

## Abstract

**Methodology to evaluate energy generation projects implementation based on Municipal Solid Waste (MSW) in Colombian municipalities. Soacha municipality case of study**

This paper develops and presents a tool to evaluate the implementation of solid waste based energy generation projects (Waste to Energy - WtE) in Colombian municipalities. It was developed the search of investigations and works about the subject to find out possible existing methodologies for this evaluation, in the same way the possible existing technologies and the necessary conditions for their implementation were analyzed. Afterwards, the factors that will affect the possible definition of WtE technologies viability or not, were analyzed. Finally, this methodology was applied in the municipality of Soacha, Cundinamarca to assess the viability of four (4) WtE technologies, incineration, co-processing, anaerobic digestion, gas capture in landfills and Pyrolysis/Gasification; the assessment result shows that no one of them is feasible to be developed in Soacha. It was elaborated a systematic procedure to assess this type of projects, but in order to achieve an evaluation who provides a tool for those who make decisions regarding the policies and execution of MSW management, it is necessary the suitability of the evaluator or evaluation team and get accurate and complete information.

**Keywords:** (Waste to Energy, Solid Waste Management, feasibility, methodology).

# Contenido

	Pág.
<b>Resumen .....</b>	<b>IX</b>
<b>Lista de figuras.....</b>	<b>XIII</b>
<b>Lista de tablas .....</b>	<b>XIV</b>
<b>Lista abreviaturas.....</b>	<b>XV</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>1. Capítulo 1. Diseño metodológico .....</b>	<b>4</b>
<b>2. Capítulo 2. Justificación .....</b>	<b>7</b>
<b>3. Capítulo 3. Antecedentes.....</b>	<b>19</b>
3.1 Situación en Colombia .....	20
3.2 Situación en Soacha .....	22
<b>4. Capítulo 4. Gestión Integral de Residuos Sólidos .....</b>	<b>25</b>
4.1 WtE – Waste to Energy .....	25
4.1.1 Incineración de residuos sólidos municipales .....	25
4.1.1.1 Descripción técnica.....	26
4.1.1.2 Aspectos ambientales.....	26
4.1.1.3 Aspectos financieros y económicos .....	26
4.1.2 Co procesamiento o Incineración de Combustible Derivado de los Residuos .....	27
4.1.2.1 Descripción técnica.....	27
4.1.2.2 Aspectos ambientales.....	27
4.1.2.3 Aspectos financieros y económicos .....	28
4.1.3 Digestión anaeróbica para generación de biogás .....	28
4.1.3.1 Descripción técnica.....	28
4.1.3.2 Aspectos ambientales.....	29
4.1.3.3 Aspectos financieros y económicos .....	29
4.1.4 Captura de gas de los rellenos sanitarios .....	29
4.1.4.1 Descripción técnica.....	30
4.1.4.2 Aspectos ambientales.....	30
4.1.4.3 Aspectos financieros y económicos .....	31
4.1.5 Pirolisis/Gasificación .....	31
4.1.5.1 Descripción técnica.....	31
4.1.5.2 Aspectos ambientales.....	32
4.1.5.3 Aspectos financieros y económicos .....	32

<b>5. Capítulo. 5. Aspectos por considerar para la evaluación de proyectos de WtE</b>	<b>33</b>
5.1 Evaluación de aspectos técnicos .....	42
5.2 Evaluación de aspectos económicos y financieros.....	48
5.2.1 Evaluación de aspectos económicos.....	48
5.2.2 Evaluación de aspectos financieros.....	51
5.3 Evaluación de aspectos ambientales .....	55
5.4 Evaluación de tecnologías .....	60
<b>6. Capítulo 6. Aplicación de la metodología: caso municipio de Soacha-Cundinamarca</b>	<b>63</b>
6.1 Evaluación de aspectos técnicos .....	63
6.1.1 Fase 1 .....	67
6.1.1.1 Incineración.....	67
6.1.1.2 Co-procesamiento.....	67
6.1.1.3 Digestión anaeróbica.....	67
6.1.1.4 Captura de gas en rellenos sanitarios .....	68
6.1.1.5 Pirolisis/Gasificación .....	68
6.1.2 Fase 2.....	69
6.1.2.1 Incineración.....	69
6.1.2.2 Co-procesamiento.....	69
6.1.2.3 Digestión anaeróbica.....	70
6.1.2.4 Pirolisis/Gasificación .....	70
6.2 Evaluación de aspectos económicos y financieros.....	71
6.2.1 Evaluación de aspectos económicos.....	72
6.2.1.1 Incineración.....	72
6.2.1.2 Co-procesamiento.....	72
6.2.1.3 Digestión Anaeróbica .....	73
6.2.1.4 Pirólisis/Gasificación .....	73
6.2.2 Evaluación de aspectos financieros.....	76
6.2.2.1 Digestión Anaeróbica .....	77
6.2.2.2 Pirólisis/Gasificación .....	81
6.3 Evaluación de aspectos ambientales .....	84
6.3.1 Objetivo.....	84
6.3.2 Inventarios de entradas y salidas del proceso de Digestión Anaeróbica.....	85
6.3.3 Evaluación de Impacto Ambiental .....	86
6.3.4 Resultados .....	87
6.4 Evaluación de tecnologías .....	88
<b>7. Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>90</b>
7.1 Conclusiones .....	90
7.2 . Recomendaciones .....	92
<b>Bibliografía .....</b>	<b>93</b>

## Lista de figuras

	Pág.
<b>Figura 5-1:</b> Respuestas pregunta 2 de encuesta .....	36
<b>Figura 5-2:</b> Respuestas pregunta 3 de encuesta .....	37
<b>Figura 5-3:</b> Respuestas pregunta 4 de encuesta .....	37
<b>Figura 5-4:</b> Respuestas pregunta 5 de encuesta .....	38
<b>Figura 5-5:</b> Respuestas pregunta 6 de encuesta .....	38
<b>Figura 5-6:</b> Respuestas pregunta 7 de encuesta .....	39
<b>Figura 5-7:</b> Respuestas pregunta 8 de encuesta .....	39
<b>Figura 5-8:</b> Respuestas pregunta 9 de encuesta .....	41
<b>Figura 5-9:</b> Respuestas pregunta 10.....	41
<b>Figura 5-10:</b> Modelo de sistema de gestión ambiental basado en el ciclo PHVA .....	57
<b>Figura 6-1:</b> Costos asociados a la inversion en el proceso de digestión anaeróbica	77
<b>Figura 6-2:</b> Costos de inversión y operación de plantas de tratamiento físico y biológico.	78
<b>Figura 6-3:</b> Costos asociados a la inversion en el proceso de digestión anaeróbica	81
<b>Figura 6-4:</b> Costos de inversión y operación de plantas de tratamiento físico y biológico.	81
<b>Figura 6-5:</b> Diagrama de análisis del ciclo de vida para el proceso de D.A. de residuos sólidos ordinarios .....	85

## Lista de tablas

	Pág.
<b>Tabla 2-1:</b> Resumen Búsqueda Sistemática .....	10
<b>Tabla 2-2:</b> Relación documentos relativos a evaluación de proyectos WtE .....	12
<b>Tabla 5-1:</b> Información demográfica de la zona .....	44
<b>Tabla 5-2:</b> Relación de la cantidad de residuos generados .....	45
<b>Tabla 5-3:</b> Caracterización fisicoquímica de los residuos generados .....	45
<b>Tabla 5-4:</b> Relación de tipos de tecnologías por condiciones del área de estudio .....	47
<b>Tabla 5-5:</b> Tipos de tecnologías WtE y sus condiciones de uso .....	47
<b>Tabla 5-6:</b> Matriz de comparación de alternativas viabilizadas .....	50
<b>Tabla 5-7:</b> Proyección de costos de operación en 20 años .....	52
<b>Tabla 5-8:</b> Relación de indicadores .....	54
<b>Tabla 5-9:</b> Comportamientos por tipo de tecnología en los sitios de evaluación .....	54
<b>Tabla 5-10:</b> Inventario de entradas y salidas del sistema .....	59
<b>Tabla 5-11:</b> Análisis de impactos y resultados .....	59
<b>Tabla 6-1:</b> Información demográfica del municipio de Soacha .....	64
<b>Tabla 6-2:</b> Relación de cantidad de residuos generados .....	65
<b>Tabla 6-3:</b> Caracterización fisicoquímica de los residuos generados .....	65
<b>Tabla 6-4:</b> Relación de tipos de tecnologías por las condiciones del área de estudio .....	69
<b>Tabla 6-5:</b> Tipos de tecnologías WtE y sus condiciones de uso .....	70
<b>Tabla 6-6:</b> Matriz de comparación de alternativas viabilizadas .....	75
<b>Tabla 6-7:</b> Comparativo de costos DA .....	78
<b>Tabla 6-8:</b> Cantidad de residuos estimados a tratar el primer año .....	79
<b>Tabla 6-9:</b> Parámetros supuestos para proyección .....	80
<b>Tabla 6-10:</b> Comparativo de costos Pirólisis/Gasificación .....	82
<b>Tabla 6-11:</b> Cantidad de residuos estimados a tratar el primer año .....	83
<b>Tabla 6-12:</b> Parámetros supuestos para proyección .....	83
<b>Tabla 6-13:</b> Inventario de entradas y salidas .....	85
<b>Tabla 6-14:</b> Análisis de impactos y resultados .....	87

# Lista abreviaturas

## Abreviaturas

<b>Abreviatura</b>	<b>Término</b>
--------------------	----------------

<i>BID</i>	Banco Interamericano de Desarrollo
<i>DA</i>	Digestión anaeróbica
<i>FNCER</i>	Fuente no convencional de energía renovable
<i>GEI</i>	Gases de efecto invernadero
<i>GRSM</i>	Gestión de residuos sólidos municipales
<i>MDL</i>	Mecanismo Desarrollo Limpio
<i>PGIRS</i>	Plan de gestión integral de residuos sólidos
<i>PHVA</i>	Planificar-Hacer-Verificar-Actuar
<i>RSM</i>	Residuos sólidos municipales
<i>SSPD</i>	Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios
<i>UPME</i>	Unidad de Planeación Minero Energética
<i>WtE</i>	Waste to energy



# Introducción

El término basura se refiere a los materiales sólidos indeseables procedentes de actividades humanas de índole residencial, industrial y/o comercial (Hasnine et al., 2022) y así como las sociedades se desarrollan, los residuos generados por estas van aumentando y variando, haciendo que su manejo o gestión sea cada vez más complejo. Complementando lo anterior se tiene que, el Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES), máxima autoridad colombiana de planeación que asesora al Gobierno en todos los aspectos relacionados con el desarrollo económico y social del país (DNP, 2016), en su documento CONPES 3530 define residuo sólido o basura como: "... cualquier objeto, material, sustancia o elemento sólido resultante del consumo o uso de un bien doméstico, industrial, comercial, institucional o actividades de servicio, que el generador deja, rechaza o entrega para usarse o convertirse en un nuevo bien, con valor económico, o para su disposición final" (Sepúlveda, 2016, p. 2)

Cada uno de los habitantes del planeta se ve afectado por problemas asociados con la Gestión de Residuos Sólidos Municipales (Municipal Solid Waste Management), cuyo objetivo principal es buscar estrategias que impliquen el manejo de los residuos dentro de un ambiente sostenible. Esto se enfoca en los aspectos que pueden verse afectados en caso contrario, como la salud, el ambiente, el uso de la tierra, los recursos y aspectos económicos; de hecho, una ciudad que no pueda gestionar el manejo de sus residuos difícilmente podrá gestionar otros asuntos más complejos como la salud, el transporte y la educación (Sharma and Jain, 2020a).

La gestión de residuos sólidos puede verse como un problema de cadena de suministro, que involucra los procesos, entre otros, de generación de residuos, recolección, separación de materiales aprovechables, distribución de subproductos aprovechados, procesamiento y disposición final; por esta razón, dicha gestión, es susceptible de mejoras, en la eficiencia de dichos procesos, mediante la implementación de procedimientos adecuados para la gestión de estos (Fetanat et al., 2019).

Como alternativa al mejoramiento del proceso de Gestión de Residuos Sólidos Municipales (GRSM), este trabajo presentará una metodología como herramienta para evaluar la implementación de proyectos de generación de energía con base en residuos sólidos (Waste to Energy – WtE) en municipios colombianos. Se realizará la exploración de investigaciones y/o trabajos realizados sobre el particular, para evidenciar posibles metodologías existentes para esta evaluación. Igualmente se analizarán las tecnologías, de WtE, existentes y las condiciones necesarias para su implementación, posteriormente se analizarán los factores que incidirán en la posible definición de la viabilidad o no de la implementación de este tipo de tecnologías. Finalmente, se aplicará la metodología, que se desarrolle, en el municipio de Soacha, Cundinamarca.

Los Residuos Sólidos Municipales (RSM) tienen como uno de sus posibles destinos los sitios conocidos como rellenos sanitarios, sitios que básicamente son obras de ingeniería en donde estos residuos se disponen en el suelo buscando ocupar el menor espacio y minimizando sus posibles afectaciones al ambiente o a la salud humana; los RSM dispuestos en estos sitios, luego de un proceso de digestión anaerobia<sup>1</sup> de su componente orgánico, generan líquidos altamente contaminantes llamados lixiviados y gases, entre otros, metano (CH<sub>4</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), ambos considerados Gases de Efecto Invernadero (GEI), es decir, que inciden en el aumento del calentamiento global (Silva dos Santos et al., 2018).

Conforme a lo anterior y a manera de resumen se tiene que los RSM dispuestos en rellenos sanitarios, por un lado, ante inadecuados manejos, son susceptibles de poder llegar a generar contaminación en agua y suelo; y por el otro producen GEI (Mutz et al., 2017). Sin embargo, es posible buscar alternativas para aprovechar estos residuos y minimizar los impactos que generan, en particular los asociados a la generación de GEI, tal como se ha

---

<sup>1</sup> Digestión Anaerobia es la descomposición de materia orgánica a través de microorganismos en ausencia de oxígeno (Mutz et al., 2017).

---

establecido en los diferentes acuerdos internacionales sobre Cambio Climático, entre los que se encuentra el Acuerdo de Paris de 2015<sup>2</sup> (CRA, 2019).

En Colombia la Ley 142 de 1994, en su artículo 5, establece que los municipios son responsables de asegurar que se preste de manera eficiente, entre otros, el servicio público de aseo y energía eléctrica a sus habitantes a través de empresas de servicios públicos de origen público, mixto (capital privado y público) o privado (Superintendencia de Servicios Públicos, 2015). En este orden de ideas, son las administraciones municipales quienes deben propender por la ejecución de las políticas que promueve el Estado colombiano sobre el particular, según lo indica la Comisión de Regulación de Agua y Saneamiento Básico - CRA (2019) y la Ley 1715 (2014); y dado que su implementación es muy riesgosa, al ser proyectos no solo sujetos a factores económicos sino también de índole ambiental, técnicos, financieros, legal, etc., se hace necesario poder contar con herramientas que permitan evaluar la viabilidad de implementar proyectos de generación de energía con residuos sólidos (Waste to Energy - WtE) en Colombia.

Con este trabajo se busca elaborar una metodología, que proporcione una herramienta para que las administraciones municipales y/o las empresas prestadoras del servicio público de aseo tengan elementos o guías para poder determinar cuáles son los aspectos, en su orden de relevancia, que deben evaluarse para determinar la conveniencia de desarrollar este tipo de proyectos en el municipio del que son responsables.

---

<sup>2</sup> Acuerdo entre 195 naciones miembros de las Naciones Unidas que estableció medidas para la reducción de Gases de Efecto Invernadero, adoptado el 12 de diciembre de 2015 y abierto para firma el 22 de abril de 2016 (CRA, 2019).

## 1. Capítulo 1. Diseño metodológico

Teniendo en cuenta que lo que se busca con este trabajo es elaborar un elemento práctico para resolver un problema, se plantea trabajar con un enfoque pragmático según definición de Peirce y James citados por Duque (2002) y Bromley (2008).

De acuerdo con Bromley (2008), el enfoque pragmático lleva a despejar dudas para llegar a una realidad o verdad luego de establecer razones para actuar o justificación de la necesidad de afrontar el problema.

Posteriormente, este enfoque, plantea la utilización del conocimiento existente sobre la temática, punto en donde toma relevancia el acudir a expertos o personas con conocimiento amplio de la problemática en estudio.

Un siguiente punto que plantea este enfoque es construir herramientas que expliquen y puedan describir posibles resultados en el futuro, que para el caso del presente trabajo sería la elaboración de la metodología misma para abordar la evaluación de tecnologías.

Con base en lo anterior se plantea el siguiente diseño metodológico que partirá de las razones planteadas en la introducción y justificación del presente trabajo.

1. Definir los parámetros o criterios para la evaluación de proyectos de WtE, conforme a la realidad colombiana.

- 1.1 Realizar búsqueda de literatura relativa a estándares de evaluación para proyectos de WtE.
- 1.2 Con base en la búsqueda realizada determinar los parámetros o criterios a utilizar para la evaluación de este tipo de proyectos.
- 1.3 Elaboración de encuesta, dirigida a profesionales con amplia trayectoria dentro del sector y conocimiento de la GRSM, para validar el peso ponderado de los parámetros seleccionados.
2. Estructurar la metodología de evaluación del proyecto WtE para la realidad colombiana.
  - 2.1 Identificar procesos metodológicos aplicables a evaluación de proyectos de este tipo.
  - 2.2 Analizar los procesos metodológicos más significativos dentro del universo identificado.
  - 2.3 Establecer el paso a paso para evaluar la implementación de proyectos WtE.
3. Aplicar la metodología elaborada para realizar la evaluación de la implementación del proyecto WtE en el municipio de Soacha.
  - 3.1 Conforme a los parámetros o criterios seleccionados realizar la búsqueda de la información correspondiente para utilizar como datos de entrada para la metodología elaborada.
  - 3.2 Desarrollo de la metodología definida.
  - 3.3 Análisis de resultados.
  - 3.4 Elaboración de conclusiones.

### Resumen del Desarrollo de la Metodología

Objetivos Específicos	Actividades Metodológicas	Variables de Trabajo o elementos de estudio necesarios
<b>1</b>	1.1 Realizar búsqueda de literatura relativa a estándares de evaluación para proyectos de WtE.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Artículos</li> <li>- Libros</li> <li>- Tesis</li> <li>- Guías de organismos internacionales</li> </ul>
	1.2 Con base en la búsqueda realizada determinar los parámetros o criterios a utilizar para la evaluación de este tipo de proyectos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Normatividad vigente</li> <li>- Regulación tarifaria</li> <li>- Tecnologías aplicables</li> <li>- Condiciones sociales del sitio de estudio: características de los residuos</li> </ul>

	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>Actividades Metodológicas</b>	<b>Variables de Trabajo o elementos de estudio necesarios</b>
		1.3 Elaboración de encuesta dentro del sector para validar el peso ponderado de los parámetros seleccionados.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Encuesta a personal con trayectoria en el sector de la GRSM</li> <li>- Análisis de resultados</li> </ul>
2	Estructurar la metodología de evaluación del proyecto WtE para la realidad colombiana.	2.1 Identificar procesos metodológicos aplicables a evaluación de proyectos de este tipo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Artículos</li> <li>- Libros</li> <li>- Tesis</li> </ul>
		2.2 Analizar los procesos metodológicos más significativos dentro del universo identificado.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Artículos</li> <li>- Libros</li> <li>- Tesis</li> </ul>
		2.3 Establecer el paso a paso para evaluar la implementación de proyectos WtE.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Información procesada</li> </ul>
3	Aplicar la metodología elaborada para realizar la evaluación de la implementación del proyecto WtE en el municipio de Soacha.	3.1 Conforme a los parámetros o criterios seleccionados realizar la búsqueda de la información correspondiente para utilizar como datos de entrada para la metodología elaborada.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alcaldía Municipal</li> <li>- Empresa prestadora del servicio público de aseo</li> <li>- Autoridad ambiental</li> <li>- Empresa de energía eléctrica</li> </ul>
		3.2 Desarrollo de la metodología definida.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Metodología elaborada</li> </ul>
		3.3 Análisis de resultados.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Resultados</li> </ul>
		3.4 Elaboración de conclusiones.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Resultados</li> </ul>

## 2. Capítulo 2. Justificación

La humanidad indistintamente de sus condiciones socioeconómicas, culturales o geográficas es una sociedad de consumo que genera residuos, pero por otra parte este consumismo también implica la utilización de recursos, entre los que se encuentra ocupando un lugar de gran importancia el consumo o utilización de energía, tanto así que el consumo de energía está en constante expansión y se estima que la demanda global se triplicará para finales de siglo (Aleixandre-Tudó et al., 2019).

Se pueden relacionar estas dos situaciones: la problemática generada por la tendencia hacia el aumento en la generación de residuos y el creciente incremento de la demanda de energía, dado que el contenido energético de los residuos sólidos es considerado como una Fuente No Convencional de Energía Renovable (FNCER) de acuerdo a la legislación colombiana, particularmente a través del artículo 18 de la Ley 1715 de 2014 (Alzate-Arias et al., 2018), en consecuencia las políticas relacionadas con los sistemas para la gestión de residuos deben considerarse conjuntamente con las políticas relacionadas con los sistemas de energía (Finnveden et al., 2005).

Siendo coherentes con esta tendencia sobre la adecuada gestión de residuos y el uso de FNCER, la política pública colombiana viene promoviendo la reducción de residuos y aprovechamiento energético de los mismos, en cumplimiento de los compromisos internacionales suscritos en relación con la gestión del cambio climático (CRA, 2019).

La conversión de energía a partir de residuos (Waste to Energy – WtE), puede ser realizada por medio de diferentes tecnologías, ya sea de orden Termoquímica, Bioquímica o Química; cada una de ellas tiene características específicas y dependiendo de ciertos parámetros, como la composición física de los residuos, su contenido de energía y en general las condiciones en que operarían las plantas de generación de energía, pueden

ser más o menos viables (World Energy Council, 2016). Sin embargo, la elección de tecnologías para estos procesos de conversión y en general para la adecuada Gestión de Residuos Sólidos se debe dar después de identificar dichas tecnologías y sus impactos negativos en el medio ambiente (Sharma and Jain, 2020a). Esto significaría la necesidad de una evaluación de orden ambiental y técnico.

No obstante, la consideración técnica del párrafo anterior, la misma nos lleva a una consideración de índole económica, debido a que la cantidad de residuos generados y su composición están directamente relacionadas con el nivel de ingresos de la sociedad que los produce, en definitiva, mayores ingresos implica mayor consumo de productos y servicios y en consecuencia mayor generación de residuos (empaques, sobrantes, etc.)

En lo relativo a aspectos financieros se debe tener en cuenta que en Colombia existe infraestructura para el manejo del biogás, producido en los rellenos sanitarios, sin embargo, gran parte de ésta ha quedado fuera de funcionamiento luego de no haber logrado recuperar siquiera los costos operacionales, dado que hay muchos factores de índole económico y financiero que inciden en el desarrollo de este tipo de proyectos, tales como los incentivos por el desarrollo de proyectos MDL (UPME Unidad de Planeación Minero-Energética and INERCO Consultoría, 2018), el mercado de energía eléctrica, el mercado de subproductos y los instrumentos de financiación (CRA, 2019), es decir, una evaluación previa de índole financiero, para este tipo de proyectos, se hace absolutamente necesaria.

Como se puede observar la condición económica y financiera es de absoluta relevancia ya que no solo incide en las condiciones de la materia prima, es decir, los residuos objeto del proceso de generación (WtE), sino que también es una limitante de acuerdo con los costos que implica la implementación de una u otra tecnología frente a los costos de generación convencional de energía, como la generación hidráulica.

En este mismo sentido, el documento “Gasificación y pirolisis de residuos: procedimientos de alto riesgo y baja rentabilidad para el tratamiento de residuos” (Tangri and Wilson, 2017) se presentan algunos ejemplos de proyectos de WtE, en países desarrollados, que

incurrieron en inversiones de millones de dólares y fracasaron, estos fueron los más recientes:

- Air Products, Teeside, Tees Valley, Reino Unido: el proyecto inició en 2014 pero en 2016 éste se abandonó después que el gerente general afirmara que la tecnología implementada resultó ser más compleja de lo que se pensó inicialmente. Se calcula que se realizaron inversiones de entre 900 y 1000 millones de dólares.
- Scotgen (subsidiario de Ascot Environmental), Dargavel, Escocia, Reino Unido: la empresa Scotgen implementó este proyecto en 2009 pero en 2012 la Agencia Escocesa de Protección Ambiental les revocó el permiso de funcionamiento después de múltiples incumplimientos en cuanto a los niveles de emisiones, indicando, entre otros, que el flujo financiero del proyecto no era suficiente para cumplir con los requerimientos del permiso.
- Plasco, Ottawa, Canadá: en 2012 la empresa Plasco firmó un contrato, por 180 millones de dólares, con la ciudad de Ottawa para desarrollar un proyecto por 20 años, durante dos años la empresa no respetó las obligaciones financieras y en 2015 la ciudad puso fin al contrato de manera unilateral.
- New Earth Solutions, Reino Unido: esta empresa estaba asociada en varios proyectos en el Reino Unido y en 2016 anunció que no sería capaz de responder a sus acreedores, indicando entre otras que los costos de operación y mantenimiento resultaron ser más altos de lo planeado. Se estima que hubo pérdidas del orden de los 11.4 millones de libras.

Los anteriores ejemplos ponen en evidencia la necesidad de ser consecuentes con la realidad colombiana y sus condiciones económicas, por lo cual, se reafirma la imperante necesidad de la realización de una evaluación previa para implementar proyectos de WtE.

Por otro lado, al realizar una búsqueda sistemática en las bases de datos del repositorio de la Universidad Nacional de Colombia, Emerald Insight, Scopus y Web of Science no se ha identificado, dentro de las metodologías encontradas, una que se enfoque en la evaluación de este tipo de proyectos en Colombia.

En la Tabla 2-1 se puede observar, resaltado en azul, los criterios de búsqueda de documentos investigativos que incluyen términos como evaluación, metodología, viabilidad, generación de energía y además Colombia; evidenciando que a nivel de temática hay muy pocos artículos, tan solo 3, enfocados en el tema y dentro de los mismos ninguno que se refiera a un direccionamiento o metodología para la evaluación de este tipo de proyectos.

**Tabla 2-1:** Resumen Búsqueda Sistemática

Criterio de búsqueda – Ecuación	Buscador	Cantidad de documentos encontrados			
		Scopus	Web of Science	Emerald Insight	Repositorio UNAL
("gasification") and ("solid waste")	Scopus, Web of Science, Emerald Insigth	1723	1205	48	
("gasification") and ("solid waste") and Colombia	Scopus, Web of Science, Emerald Insigth	14	3	4	
("gasification") and ("solid waste") and Colombia and "project assessment"	Scopus, Web of Science, Emerald Insigth	0	0	0	
("gasification") and ("solid waste") and Colombia and "feseability assessment"	Scopus, Web of Science, Emerald Insigth	0	0	0	
("gasification") and ("solid waste") and Colombia and "viability assessment"	Scopus, Web of Science, Emerald Insigth	0	0	0	
biogas and "solid waste"	Scopus, Web of Science, Emerald Insigth	2264	120	101	
biogas and "solid waste" and Colombia	Scopus, Web of Science, Emerald Insigth	9	0	6	
trend and "alternative energy"	Scopus, Web of Science, Emerald Insigth	882	4	575	
trend and "alternative energy" and Colombia	Scopus, Web of Science, Emerald Insigth	1	0	26	
"Energía alternativa"	Scopus, Web of Science, Emerald Insigth	6	0	7	
"Energía alternativa" and Colombia	Scopus, Web of Science, Emerald Insigth	0	0	1	
"energetic evaluation" AND waste	Scopus, Web of Science, Emerald Insigth	17	3	0	

Criterio de búsqueda – Ecuación	Buscador	Cantidad de documentos encontrados			
		Scopus	Web of Science	Emerald Insight	Repositorio UNAL
"energetic evaluation" AND waste and Colombia	Scopus, Web of Science, Emerald Insight	0	0	0	
"waste management" AND Colombia	Scopus, Web of Science, Emerald Insight	124	41	85	
upme AND Colombia	Scopus, Web of Science, Emerald Insight	12	0	3	
methodology and feasibility and project and energy and "solid waste"	Scopus, Web of Science	0	0	0	
methodology and viability and project and energy and "solid waste"	Scopus, Web of Science	2	0	141	
methodology and viability and project and energy and "solid waste" and Colombia	Scopus, Web of Science	0	0	8	
metodología "residuos sólidos"	Repositorio UNAL				39
metodología "residuos sólidos" aprovechamiento	Repositorio UNAL				16
metodología "residuos sólidos" aprovechamiento energía	Repositorio UNAL				11
metodología "residuos sólidos" aprovechamiento "generación de energía"	Repositorio UNAL				1
metodología viabilidad gasificación	Repositorio UNAL				1
metodología viabilidad "residuos sólidos" "generación de energía"	Repositorio UNAL				1
viabilidad "residuos sólidos" "generación de energía"	Repositorio UNAL				2
methodology AND "solid waste" AND wte	Scopus	52	52		

Nota. Fuente: Base de datos de la Universidad Nacional. Proyectos encontrados para la evaluación de proyectos en Colombia.

No obstante, en esta búsqueda inicial de información se encontraron documentos que plantean alternativas de evaluación, particularmente enfocadas en la evaluación económica de proyectos de WtE para países o regiones diferentes, puntualmente para Colombia se encontró una metodología para la evaluación de sostenibilidad y un análisis teórico de la normatividad relativa, como podemos observar en la **Tabla 2-2**, que se presenta a continuación:

**Tabla 2-2:** Relación documentos relativos a evaluación de proyectos WtE

Título del documento	Autor	Fuente	Año	Tema relevante para la investigación	Limitaciones	Tipo de evaluación
Potential for greenhouse gas reduction and energy recovery from MSW through different waste management technologies	Yaman, C., Anil, I., Alagha, O.	Journal of Cleaner Production	2020	Relaciona opciones para mejorar la gestión de residuos sólidos	No presenta alternativas de evaluación de las opciones planteadas	No Aplica
Municipal solid waste generation, composition, and management: the global scenario	Sharma, K.D., Jain, S.	Social Responsibility Journal	2020	Presenta una serie de factores que deben ser analizados para seleccionar la mejor tecnología WtE para aplicar en determinados sitios. Plantea la metodología LCA como alternativa de evaluación del aspecto ambiental de estos proyectos	Solo plantea los factores a considerar, pero no desarrolla o propone alternativas para evaluarlos	Ambiental
Review of life-cycle environmental consequences of waste-to-energy solutions on the municipal solid waste management system	Istrate, I.-R., Iribarren, D., Gálvez-Martos, J.-L., Dufour, J.	Resources, Conservation and Recycling	2020	Plantea la metodología LCA para evaluar los impactos ambientales de proyectos WtE	Se enfoca exclusivamente en la evaluación ambiental dejando de lado otros aspectos a tener en cuenta	Ambiental
Promoting circular economy in the surroundings of an organic fraction of municipal solid waste	Abad Vanesa, Avila Romina, Vicent Teresa, Font Xavier	Bioresource Technology	2019	Realiza un análisis detallado de los costos del tratamiento de residuos dentro de un esquema de	Estudio o análisis realizado para un país desarrollado (España) con condiciones diferentes a la	Económica

Título del documento	Autor	Fuente	Año	Tema relevante para la investigación	Limitaciones	Tipo de evaluación
anaerobic digestion treatment plant: Biogas production impact and economic factors				economía circular	realidad colombiana	
Future biogas resource potential in India: A bottom-up analysis	Mittal Shivika, Ahlgren Erik O., Shukla P.R.	Renewable Energy	2019	Estima el potencial de biogás de los residuos municipales	El documento se refiere al análisis de uno de los factores únicamente, desarrollado para la India.	Tecnológico
Informing energy justice based decision-making framework for waste-to-energy technologies selection in sustainable waste management: A case of Iran	Abdolvahhab Fetanat, Hossein Mofid, Mojtaba Mehrannia, Gholamreza Shafipour	Journal of Cleaner Production	2019	Realiza el análisis y estructuración para un enfoque de marco de decisión para la selección de tecnologías de Waste to Energy dentro de la gestión de residuos municipales	Análisis teórico con poca practicidad para su aplicación	Tecnológico y económica
Bioenergía, una alternativa energética sustentable para Colombia. Aplicación del Concepto Integrado de Sostenibilidad (ICoS)	Ruiz Restrepo, Mabel Alejandra	Repositorio Universidad Nacional	2019	Desarrolla una metodología para evaluar la sostenibilidad de proyectos de Bioenergía en Colombia	Se limita al tema de sostenibilidad, pero no plantea etapa inicial de implementación	Sostenibilidad
Integrated decision-support methodology for combined centralized-decentralized waste-to-energy management systems design	Kuznetsova, E., Cardin, M.-A., Diao, M., Zhang, S.	Renewable and Sustainable Energy Reviews	2019	Plantea una metodología estructurada para la evaluación ambiental, económica y social de alternativas para la gestión de los residuos sólidos	Poco pragmático	Ambiental y económica

Título del documento	Autor	Fuente	Año	Tema relevante para la investigación	Limitaciones	Tipo de evaluación
Environmental assessment of municipal solid waste by two-stage plasma gasification	Ramos, A., Teixeira, C.A., Rouboa, A.	Energies	2019	Plantea la metodología LCA para evaluar los impactos ambientales de proyectos WtE	Se enfoca exclusivamente en la evaluación ambiental dejando de lado otros aspectos a tener en cuenta	Ambiental
Assessment of Government Incentives for Energy from Waste in Colombia	Alzate-Arias Santiago, Jaramillo-Duque Álvaro, Villada Fernando, Restrepo-Cuestas Bonie	Sustainability	2018	Evalúa la prefactibilidad de proyectos de generación de energía a partir de residuos sólidos en el marco de la legislación colombiana pertinente.	El estudio utiliza datos teóricos y condiciones ideales para su análisis.	Económica
Environmental and economic analysis of power generation in a thermophilic biogas plant	Ruiz D., San Miguel G., Corona B., Gaitero A., Domínguez A.	Science of the Total Environment	2018	Presenta un análisis ambiental y económico de una planta de generación de energía a base de residuos, representa una guía para el proyecto en desarrollo.	Desarrollado para una planta en un país desarrollado (España) cuyas condiciones difieren de la realidad colombiana	Ambiental y económica
Waste-to-energy, municipal solid waste treatment, and best available technology: Comprehensive evaluation by an interval-valued fuzzy multi-criteria decision making method	Wang Zhenfeng, Ren Jingzheng, Goodsite Michael Evan, Xu Guangyin	Journal of Cleaner Production	2018	Realiza el análisis y estructuración para un enfoque de marco teórico de decisión para la selección de tecnologías de Waste to Energy dentro de la gestión de residuos municipales.	Análisis teórico con poca practicidad para su aplicación. El estudio se desarrolla en China, un país con condiciones económicas muy diferentes a las colombianas	Económica

Título del documento	Autor	Fuente	Año	Tema relevante para la investigación	Limitaciones	Tipo de evaluación
Biogás como una fuente alternativa de energía primaria para el Estado de Jalisco, México	Vera Romero Iván, Estrada-Jaramillo Melitón, González-Vera Conrado, Tejeda-Jiménez Martín, López-Andrade Xiconténcatl, Ortiz-Soriano Agustina	Ingeniería Investigación y Tecnología	2017	Establece un comparativo financiero entre dos fuentes de generación de biogás presentando datos preliminares y generales sobre el particular	Presenta poca profundidad en el análisis de costos, estudio caso mexicano	Económica
A financial feasibility model of gasification and anaerobic digestion waste-to-energy (WTE) plants in Saudi Arabia	Hadidi Laith A., Omer Mohamed Mahmoud	Waste Management	2017	El trabajo presenta un análisis financiero completo de la viabilidad de proyectos WTE con sus respectivas conclusiones. No obstante referirse al caso de Arabia Saudita es un buen referente dado que los procesos de gestión de residuos municipales son muy similares a los manejados en Colombia	El estudio es específico para Arabia Saudita y utiliza información de antes de 2015	Económica
Waste Management Pinch Analysis (WAMPA): Application of Pinch Analysis for greenhouse gas (GHG) emission reduction in municipal solid waste management	Ho, W.S., Hashim, H., Lim, J.S., Lee, C.T., Sam, K.C., Tan, S.T.	Applied Energy	2017	Establece los factores que deben ser tenidos en cuenta para la evaluación de proyectos WtE	Poco pragmático	Tecnológica

Título del documento	Autor	Fuente	Año	Tema relevante para la investigación	Limitaciones	Tipo de evaluación
Sustainable waste management: Waste to energy plant as an alternative to landfill	Cucchiella, F., D'Adamo, I., Gastaldi, M.	Energy Conversion and Management	2017	Plantea varios métodos para evaluar la gestión sostenible de residuos sólidos	Artículo de 2017	Ambiental, económica y tecnológica
Selecting sustainable waste-to-energy technologies for municipal solid waste treatment: A game theory approach for group decision-making	Soltani Atousa, Sadiq Rehan, Hewage Kasun	Journal of Cleaner Production	2016	Presenta un marco de decisión para la evaluación ambiental y económica de opciones para la gestión de residuos sólidos municipales en una región de Canadá.	Desarrollado para una planta en un país desarrollado (Canadá) que difiere de la realidad colombiana. La consecución de datos acertados y escenarios reales para el análisis es una limitación de este estudio.	Ambiental y económica
An optimization model for economic feasibility analysis and design of decentralized waste-to-energy systems	Xiong, J., Ng, T.S.A., Wang, S.	Energy	2016	Plantea metodología para evaluar factibilidad económica de tecnologías WtE	Solo analiza el aspecto económico, artículo de 2016	Económica
A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste	Lombardi Lidia, Carnevale Ennio, Corti Andrea	Waste Management	2015	Presenta un análisis muy completo de las diferentes alternativas de tratamiento térmico de residuos y el tipo de residuos utilizado para este proceso.	La información es tomada de publicaciones científicas, pero no comprende casos reales de aplicación. El estudio se desarrolla en la realidad de países desarrollados que difieren de la realidad colombiana.	Tecnológico
A multi-criteria analysis of options for energy recovery from municipal solid	Yap, H.Y., Nixon, J.D.	Waste Management	2015	Plantea varios métodos para evaluar la gestión sostenible de residuos sólidos	Artículo de 2015	Ambiental, económica y tecnológica

Título del documento	Autor	Fuente	Año	Tema relevante para la investigación	Limitaciones	Tipo de evaluación
waste in India and the UK						
Techno-economic analysis and environmental impact assessment of energy recovery from Municipal Solid Waste (MSW) in Brazil	Leme, M.M.V., Rocha, M.H., Lora, E.E.S., Venturini, O.J., Lopes, B.M., Ferreira, C.H.	Resources, Conservation and Recycling	2014	Plantea varios métodos para evaluar la gestión sostenible de residuos sólidos	Artículo de 2014	Ambiental, económica y tecnológica
Waste to energy - An evaluation of the environmental impact	Pavlas, M., Tou, M., Bébar, L., Stehlík, P.	Applied Thermal Engineering	2010	Realiza un análisis general de las tecnologías existentes para proyectos WtE	Se enfoca exclusivamente en la evaluación ambiental dejando de lado otros aspectos a tener en cuenta. Artículo de 2010	Ambiental

Nota. Documentos alternativos para la evaluación económica de proyectos de WtE.

Con base en lo presentado anteriormente se observa que, en Colombia, es posible generar alternativas que integren dentro de la gestión de los residuos sólidos la generación de energía (WtE) atendiendo de esta manera dos necesidades propias del devenir de cualquier comunidad, sin embargo, para el desarrollo de estos proyectos en Colombia es imprescindible contar con herramientas que permitan, a las administraciones municipales y/o a los operadores del servicio público de aseo, implementar dentro de la Gestión de Residuos Sólidos que desarrollan, procesos de WtE en el marco de las condiciones actuales del país.

Teniendo en cuenta que no se puede abarcar todo el territorio colombiano para desarrollar este trabajo se hace necesario definir una localidad que refleje condiciones comunes con los municipios promedio del país y que para el investigador signifique poder acceder de manera permanente a información pertinente para el estudio y en caso dado ser objeto de visitas. En este orden de ideas se elige el municipio de Soacha como localidad objeto del

estudio. Este municipio limita al oriente con la ciudad de Bogotá y actualmente es uno de los municipios colombianos con mayor desorden físico, espacial y ambiental dentro de su territorio (Alcaldía Municipal de Soacha, 2020), de igual manera según datos del Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE), para 2018, tenía una población proyectada de 660,179 habitantes (DANE, 2018). Durante 2021 el municipio de Soacha generó un promedio de 14.305 ton/mes de residuos sólidos según el Sistema Único de Información de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios – SSPD (SUI, n.d.).

### **3. Capítulo 3. Antecedentes**

Según datos de las Naciones Unidas (2015) el crecimiento de la población urbana se proyecta en llegar a 9,700 millones de habitantes en 2050, y de acuerdo con el documento guía *Waste-to-Energy Options in Municipal Solid Waste Management* (2017), se considera que “el siglo XXI será el siglo de las ciudades”; este crecimiento de la población en las ciudades va de la mano con el incremento del consumo de bienes, pero no solo por la razón de la mayor cantidad de habitantes en el planeta, sino también por el aumento del poder adquisitivo por parte de las clases medias en surgimiento y el cambio en los estilos de vida (p. 11). En este sentido el aumento de la población y desarrollo de la sociedad tiene, entre una de sus consecuencias, el incremento desmedido de la generación de residuos sólidos, lo que implica la búsqueda de alternativas viables para su adecuado manejo o gestión (Heidari et al., 2019).

Esta población, referenciada en el párrafo anterior, tiene relación directa con los desechos que se producen día a día en el mundo, de manera que se tienen reportes que indican que a nivel mundial se generan alrededor de 2,000 (dos mil) millones de toneladas de Residuos Sólidos Municipales (RSM) al año, estando estos residuos compuestos, entre otros, por un porcentaje importante de materia orgánica biodegradable y con potencial energético que, dependiendo del nivel de ingresos del país, puede variar entre el 34% y 53% (Abad et al., 2019; Sharma and Jain, 2020a).

Datos de 2016 indicaban que el 34% de los RSM fueron generados por los países de ingresos altos, catalogados de esta manera de acuerdo con el nivel de su Producto Interno Bruto (PIB), el 32% por países de ingresos medio altos, el 29% por países de ingresos medio bajos y los países de ingresos bajos solo generaron el 5%. El nivel de ingresos de un país, también, determina la composición general de sus residuos, en un país de ingresos altos la fracción orgánica de los residuos es de un poco más del 30%, mientras que en un país de ingresos bajos este mismo tipo de materiales están por encima del 50%;

la cantidad y composición de los residuos hace parte de los parámetros que definen la escogencia de la tecnología más adecuada para la gestión de residuos sólidos (Sharma and Jain, 2020a).

Los gases generados en rellenos sanitarios, que van de la mano con la composición general de los residuos sólidos, son considerados GEI ya que están, principalmente, compuestos por metano ( $\text{CH}_4$ ), entre el 45% y 65%, y dióxido de carbono, entre el 40% y 60%, ( $\text{CO}_2$ ); ambos gases con una gran capacidad para capturar energía solar (Yaman et al., 2020). Dentro de estos GEI, generados por la descomposición de la fracción orgánica de los residuos en los rellenos sanitarios, uno de los más relevantes, como se indicó anteriormente, es el metano ( $\text{CH}_4$ ), que es setenta y dos (72) veces más generador de calentamiento global que el Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ) (Sharma and Jain, 2020b). La situación es más compleja dado que se estima que en los países desarrollados, entre el 8% y 12% de los GEI son producidos por actividades relacionadas con la Gestión de Residuos Sólidos (Sharma and Jain, 2020b) e igual de preocupante y asociado a esto es que, entre el 3% y 9% de las emisiones antropogénicas de metano en el mundo se generan en los rellenos sanitarios.

La Gestión de Residuos Sólidos Municipales (GRSM), en países en vía de desarrollo, es responsabilidad de las administraciones locales y representaba cerca del 50% de su presupuesto, de acuerdo a lo indicado por el Banco Mundial para el año 2014 (Aleluia and Ferrão, 2017), de esta situación surge la necesidad de evaluar y determinar cuál es el procedimiento o tecnología de menor costo, con menos afectación al medio ambiente y que represente el manejo más adecuado de los residuos generados por cada localidad.

### **3.1 Situación en Colombia**

Sobre la GRSM en Colombia, cifras oficiales indicaban que finalizado el año 2017, el 99% de los Residuos Sólidos Municipales (RSM) generados en el país eran manejados mediante procedimientos consistentes en sistemas de enterramiento tecnificados, disposición de residuos utilizando la tecnología de rellenos sanitarios, o no tecnificados, como simplemente botaderos a cielo abierto (SSPD, 2018).

Informes más recientes, inclusive son más precisos en indicar que durante el año 2020 el 92.30% de los municipios colombianos dispusieron sus residuos en sitios autorizados y el restante 7.70% en sitios no autorizados, entendiéndose estos últimos como sitios sin licencia ambiental que no cumplen con la normatividad vigente y crean riesgos para la seguridad y salud humana; y para el medio ambiente en general de manera significativa (SSPD, 2021).

En este mismo sentido, y como se ha venido indicando en el presente documento, este tipo de manejo de los RSM mediante enterramiento conduce, entre otras, a la producción de biogás, lo que a la larga genera afectaciones a la sociedad, en la medida que todo aporte a la generación de GEI incide en el aumento de la temperatura global. Sin embargo, la implementación de sistemas de captura y quema o generación de energía, a partir del biogás producido en los rellenos sanitarios, es una alternativa efectiva para disminuir la generación de este tipo de gases (CRA, 2019).

En Colombia la política de gestión de residuos sólidos debe ser definida por los entes territoriales o alcaldías municipales a través de los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS), definidos en el Decreto 1077 (2015), en donde se establecen los lineamientos a seguir para el adecuado manejo de los residuos generados en dicha localidad. Actualmente estos programas plantean el cumplimiento de metas que signifiquen la reducción en la generación de residuos y el aprovechamiento de estos, de manera coincidente con las políticas nacionales, sin embargo, en su gran mayoría no ha ejecutado y cerrado proyectos sobre el particular. De aquí la importancia de generar herramientas que permitan a los líderes o cabezas de cada territorio proponer e incorporar medidas concretas de manejo.

Por otro lado, y tal como se indicó anteriormente, la legislación colombiana, a través de la Ley 1715 de 2014 (Alzate-Arias et al., 2018) establece que el contenido energético de los residuos sólidos, tanto por el potencial del biogás como generador de energía como por el potencial calórico del residuo como tal, es considerado una Fuente No Convencional de Energía Renovable (FNCER).

De igual manera el Estado colombiano promueve el desarrollo y utilización de FNCER

como medio necesario para la reducción de GEI y la seguridad de abastecimiento energético en el territorio colombiano (Ley 1715, 2014).

Actualmente las Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER), entre las que se incluye la generación de energía utilizando los residuos sólidos municipales, solo representan el 0.7% de la Capacidad de Generación de Energía (CGE) en Colombia, conforme lo reporta la Unidad de Planeación Minero-Energética – UPME (Eras et al., 2019).

Esta misma entidad, la UPME, en 2018 contrató la elaboración de un estudio, denominado Valoración Energética de Residuos: Proyecto WTE Colombia (2018), para desarrollar un modelo con el que se pudiera determinar la viabilidad técnica, ambiental, financiera y económica de proyectos para generar biogás y recuperar energía eléctrica, a partir de la biomasa obtenida de los residuos sólidos. El estudio buscó en una primera etapa, priorizar el municipio en donde se debería realizar el programa piloto del proyecto planteado, definiendo a la ciudad de Montería, en la costa norte de Colombia, como el sitio adecuado. Posteriormente el estudio se dedicó a realizar un análisis de 3 tipos de tecnologías WTE y la definición de la más adecuada para el desarrollo del proyecto piloto, se definió la tecnología de digestión anaeróbica. Finalmente, el estudio plantea un diseño básico de la tecnología propuesta. Aunque el estudio desarrolla ampliamente aspectos fundamentales de la realidad colombiana, en cuanto a la gestión de los residuos sólidos, no ofrece un procedimiento o metodología que pueda ser replicable, para evaluar este tipo de proyectos de manera genérica.

### **3.2 Situación en Soacha**

Soacha es un municipio, del departamento de Cundinamarca, ubicado a 18 kilómetros del centro de Bogotá y hace parte de la cuenca alta del río Bogotá, está conformado por 6 comunas y 2 corregimientos (Ospina and Alvarez, 2018). A su vez Soacha es el municipio con mayor población y el primer centro industrial del departamento, también cuenta con una tasa de crecimiento poblacional del 23%, por encima de cualquier estándar mundial (Calderón-Larrañaga et al., 2021). Esta alta tasa de crecimiento en gran parte es debido a

que, por su cercanía con las zonas industriales de Bogotá, su relativa facilidad de desplazamiento hacia las mismas y el bajo costo del suelo es la ciudad dormitorio por excelencia de un alto porcentaje de la población trabajadora de la zona (Ospina and Alvarez, 2018).

Una de las principales problemáticas de Soacha, que la convierten en unas de las municipalidades más deprimidas de Colombia, es el no presentar límites definidos entre los sectores residenciales y los sectores industriales (Calderón-Larrañaga et al., 2021), situación que se refleja en que más del 77% de su población se encuentra categorizado en los estratos socioeconómicos 1 y 2; en Colombia se utiliza la estratificación entre el 0 y el 6 para identificar el nivel económico de la población, siendo el estrato 0 el que representa el nivel más bajo y el 6 el más alto (Ospina and Alvarez, 2018).

Actualmente el servicio público de aseo, en el municipio de Soacha, lo presta una empresa u operador de carácter privado, que tiene a su cargo todos los componentes del servicio y se estima una atención del 100% del sector urbano (PGIRS Decreto N° 421, 2016). Dentro de estos componentes se encuentran los servicios de recolección, transporte y disposición final de los residuos sólidos municipales. Los residuos sólidos recolectados son dispuestos en el relleno sanitario Nuevo Mondoñedo, ubicado en zona rural del municipio de Bojacá, sitio en donde se realiza el enterramiento de los residuos sin que se realice ningún tipo de separación o aprovechamiento de las 167,148 toneladas que se generan anualmente, según datos de 2020 (SSPD, 2021). Estos residuos poseen un potencial importante de generación de GEI, dada su fracción orgánica de cerca del 54%, pero también son susceptibles de ser utilizados, como materia prima, en diferentes procesos WtE, como aprovechamiento de biogás, incineración, pirolisis.



## **4. Capítulo 4. Gestión Integral de Residuos Sólidos**

### **4.1 WtE – Waste to Energy**

La sigla WtE es la abreviación del término inglés Waste to Energy, o en español Residuos para Energía, se utiliza para referirse a diversas tecnologías existentes, para tratar residuos con el fin de recuperar energía de diferentes maneras, en forma de calor, electricidad o combustibles no convencionales (Mutz et al., 2017). Una definición bastante puntual y concreta ubica al WtE como la generación de energía a partir de residuos sólidos urbanos (UPME Unidad de Planeación Minero-Energética and INERCO Consultoría, 2018), siendo una alternativa potencial de generación de energía que, es económicamente viable y ambientalmente sostenible (Kumar and Samadder, 2017).

En concordancia con lo anterior es necesario identificar las tecnologías existentes para la generación de energía a base de residuos sólidos (Waste to Energy – WtE), para lo cual se tomará como referencia las tecnologías presentadas en la guía *Waste-to-Energy Options in Municipal Solid Waste Management* (2017) y por Yap & Nixon (2015).

#### **4.1.1 Incineración de residuos sólidos municipales**

Consiste en un proceso de quema controlada de los residuos sólidos, siendo su principal objetivo la reducción de su masa y volumen, convirtiendo el residuo en un material inerte; esto procurando que sea a través de un proceso de combustión autotérmica, es decir, sin la necesidad de combustible adicional (Mutz et al., 2017). Dentro de este proceso, y a manera de efecto secundario, se obtiene la generación de energía, minerales y metales. Dentro de procesos de WtE es la tecnología más común y con una importante capacidad de reducción de Residuos Sólidos Municipales (RSM).

#### **4.1.1.1 Descripción técnica**

El proceso utiliza la fracción, dentro de los residuos sólidos, de materiales con propiedades combustibles para lograr una reacción de oxidación que puede alcanzar temperaturas de entre 850°C y 1450°C, liberando energía en forma de calor. El exceso de calor generado en este proceso puede ser utilizado para generar vapor y con el mismo generar energía eléctrica a través de turbinas diseñadas para esto. Esta tecnología depende enteramente de los materiales a utilizar como materia prima, que deben ser susceptibles de generar una reacción térmica en cadena y mantener la combustión de manera autónoma, para ello deben tener una característica física, denominada Valor Calorífico Mínimo (LCV por sus siglas en inglés), igual o superior a 7 MJ/Kg en promedio anual (Mutz et al., 2017).

#### **4.1.1.2 Aspectos ambientales**

Este proceso genera una serie de gases de combustión que deben ser permanentemente monitoreados ya que contienen contaminantes, entre otras, como cloruro de hidrogeno (HCl), fluoruro de hidrogeno (HF), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), dioxinas, dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>). La remoción de muchos de estos contaminantes implica costosos procesos (Mutz et al., 2017).

Adicionalmente, en cuanto a posibles afectaciones ambientales, el proceso de incineración genera desechos o escoria y cenizas que deben ser dispuestos de manera adecuada, genera ruido y consume agua.

#### **4.1.1.3 Aspectos financieros y económicos**

El proceso de incineración para el manejo de RSM implica grandes inversiones y grandes costos operativos durante su ejecución (Mutz et al., 2017). Aun cuando en países, con condiciones de desarrollo similares a las colombianas, hay recursos disponibles, principalmente de cooperación internacional, para invertir en este tipo de proyectos, no es

tan claro cómo será el sostenimiento de la operación del sistema. Los ingresos por venta de energía generada y de materiales recuperados durante este proceso no cubren por sí solos los costos de operación del sistema, situación que indica que se deben considerar otro tipo de ingresos asociados, como el cobro del procesamiento de los residuos, subsidios estatales o exenciones tributarias, entre otras.

#### **4.1.2 Co procesamiento o Incineración de Combustible Derivado de los Residuos**

Corresponde al uso de la fracción seca de materiales derivados de los residuos, como reemplazo directo de los combustibles fósiles tradicionales, principalmente para ser utilizados en la industria cementera y/o plantas de generación térmica (Mutz et al., 2017).

##### **4.1.2.1 Descripción técnica**

El co-procesamiento requiere que los residuos sean sometidos previamente a procesos de pretratamiento para lograr su homogenización y transformación en los llamados Combustibles Derivados de Residuos (Refuse Derived Fuel – RDF). Estos procesos de pretratamiento buscan retirar los elementos que no son susceptibles de utilizarse en el proceso de combustión y que pueden ser potencialmente aprovechables en procesos de reciclaje (Mutz et al., 2017).

##### **4.1.2.2 Aspectos ambientales**

El principal aporte de este tipo de tecnología es la reducción de impactos generados por la industria cementera al utilizar materiales recuperados minimizando la utilización de recursos no renovables (Mutz et al., 2017). No obstante, lo anterior, las emisiones generadas por los hornos de la industria cementera continúan produciendo emisiones contaminantes para la atmosfera de manera que las plantas cementeras deben incurrir en gastos para implementar procedimientos adicionales para que la utilización de los RDF efectivamente genere emisiones iguales o menores a las generadas al utilizar combustibles convencionales. Otro inconveniente, en términos ambientales, está en procurar los procesos de transporte y almacenamiento de los RDF que signifiquen los menores impactos ambientales posibles.

#### **4.1.2.3 Aspectos financieros y económicos**

Las condiciones económicas para considerar la utilización de RDF en la industria cementera se fundamentan principalmente en el menor costo de este material respecto a los combustibles y materia prima convencional como el carbón, gas, etc. No obstante, la volatilidad reciente en los precios de los combustibles fósiles convencionales ha generado incertidumbre respecto a la relación costo/beneficio de las grandes inversiones que implica la implementación de este tipo de tecnologías (Mutz et al., 2017).

#### **4.1.3 Digestión anaeróbica para generación de biogás**

La Digestión Anaeróbica (DA) se refiere a la descomposición de residuos orgánicos, por medio de microorganismos en ausencia de oxígeno, para producir biogás (Mutz et al., 2017). Dado lo anterior, esta tecnología solo aplica para la fracción orgánica de los residuos por lo que depende de buenas prácticas de separación en la fuente de rutas selectivas de recolección de residuos.

##### **4.1.3.1 Descripción técnica**

Para la generación de biogás a partir de la materia orgánica se utilizan digestores anaeróbicos en donde se propician adecuadas condiciones para que microorganismos (bacterias) transformen, el componente orgánico de los residuos, en biogás y un producto residual denominado digestato (Mutz et al., 2017).

Existen diversos tipos de digestores como los de alimentación, por rango de temperatura o del tipo reactor. En todo caso el objetivo es la generación de biogás para ser utilizado directamente para generar calor o para ser transformado, utilizando plantas de generación de energía, en calor y/o electricidad.

### **4.1.3.2 Aspectos ambientales**

Desde el punto de vista ambiental los beneficios son muy importantes en la medida que el biogás reemplazaría la utilización de otro tipo de fuentes de energía como por ejemplo los combustibles fósiles y la madera. Comparativamente con el caso de la utilización de combustibles fósiles, la utilización de biogás generado con base en residuos sólidos significa evitar la emisión adicional de gases de efecto invernadero, en la medida que el carbón contenido en la materia orgánica proviene del Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) existente en la atmósfera (Mutz et al., 2017). Respecto a la utilización de otro tipo de recurso para la generación de energía, como por ejemplo la madera, representa evitar o disminuir la utilización de recursos naturales.

### **4.1.3.3 Aspectos financieros y económicos**

Las condiciones en que se reciba la materia prima, para este caso la fracción orgánica de los residuos sólidos, para el proceso de DA se reflejarán en mayores o menores costos de operación (e ingresos) en la medida que requieran procedimientos previos de separación. Dentro de este tipo de tecnología se deben considerar los costos, no solo de generación de biogás sino de aprovechamiento de este para producción de algún tipo de energía. Residuos con una fracción orgánica importante significarán una mejor materia prima (Mutz et al., 2017).

Conforme a lo anterior, y teniendo en cuenta lo que se indicó en la Descripción técnica, hay dos formas de aprovechar el biogás: mediante su uso directo y a través de procesos para mejorar la condición del biogás o para generar electricidad y/o calor. Para el primer escenario, las inversiones adicionales a lo correspondiente al digestor serían mínimas, caso contrario en el segundo escenario que requiere de importantes inversiones adicionales.

### **4.1.4 Captura de gas de los rellenos sanitarios**

Esta tecnología se aplica dentro de los rellenos sanitarios ya existentes y funciona como una medida para mitigar el efecto de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) que se generan por sus condiciones de operación actual y ante la descomposición de la fracción

orgánica de los residuos ahí depositados. La dinámica de este proceso es similar a la del proceso de Digestión Anaeróbica (DA), la diferencia radica en que para la DA la utilización únicamente de residuos orgánicos previamente separados, por el contrario en los rellenos sanitarios se reciben residuos mezclados, dentro de los cuales se encuentra, como se indicó anteriormente, una fracción de residuos orgánicos (Mutz et al., 2017).

Esta tecnología se entiende asociada a rellenos sanitarios modernos que cumplan y apliquen estrictos estándares ambientales y sanitarios, con un manejo adecuado de los fluidos generados por la descomposición de los residuos, en su componente líquido en forma de lixiviados y en su componente gaseoso en forma de biogás, este último a través de su quema que conlleva a la generación de energía.

#### **4.1.4.1 Descripción técnica**

Los gases generados en los rellenos sanitarios contienen, entre un 45% y 55% de gas metano, gas que puede ser aprovechado para generar calor, electricidad o combustibles. La producción de estos gases depende de diferentes factores como el tipo de residuos y la humedad de estos, los procesos de cobertura utilizados, el clima y los sistemas de evacuación utilizados para permitir la salida de dichos gases (Mutz et al., 2017).

Al igual que en el proceso de Digestión anaeróbica, es necesario que posterior a la captación de estos gases, principalmente el metano, se implemente un sistema de aprovechamiento de este biogás, para la generación de energía o combustibles.

#### **4.1.4.2 Aspectos ambientales**

En términos generales el aprovechamiento de los gases generados en los rellenos sanitarios significa beneficios ambientales en la medida que el aprovechamiento del metano implica su descomposición lo que minimiza la emisión de GEI, no obstante, la existencia misma de rellenos sanitarios implica riesgos de afectación ambiental y adicionalmente por las grandes áreas que estos ocupan para su operación es muy difícil

garantizar la captación y aprovechamiento de la totalidad de gases que se generan (Mutz et al., 2017), es decir, un alto porcentaje escapa a la atmosfera con las consecuencias sobre el calentamiento global ya mencionadas.

#### **4.1.4.3 Aspectos financieros y económicos**

En países en vía de desarrollo la implementación de este tipo de tecnologías no logra ser cubierta, en términos financieros, con tan solo la venta de la energía o combustibles generados, por lo que deben articularse con ingresos adicionales correspondientes a todas las alternativas de remuneración asociados a este tipo de procedimientos (Mutz et al., 2017), como la disposición misma de residuos, la emisión de Bonos de Carbono, venta de subproductos.

### **4.1.5 Pirolisis/Gasificación**

La pirolisis/gasificación se refiere a un proceso de tratamiento térmico avanzado que involucra la oxidación parcial de una sustancia, estos procedimientos se asemejan a la incineración en cuanto a la utilización de altas temperaturas (Mutz et al., 2017), pero en condiciones que evitan o controlan mejor el componente de polución resultante del procedimiento.

#### **4.1.5.1 Descripción técnica**

Dentro del proceso de Pirolisis/Gasificación se produce la degradación de los residuos sólidos mediante el aumento de la temperatura y en condiciones controladas de oxígeno, es decir en ausencia de llama directa sobre los residuos (Mutz et al., 2017); de este proceso se obtiene como resultado la generación de gas y de coque (combustible utilizado en procesos de calderas). El principal producto de la gasificación es un gas de síntesis (syngas) que al someterse a un proceso de combustión genera energía.

Para el caso de los países en vías de desarrollo, que no cuentan con buenas prácticas sobre la separación de residuos en la fuente (sitios de generación de residuos), este tipo de tratamiento requiere de un proceso previo de selección de los materiales que son

susceptibles de este proceso de degradación. Adicionalmente este tipo de tecnología es bastante compleja y requiere de técnicos especializados para su operación.

#### **4.1.5.2 Aspectos ambientales**

Dentro de los aspectos ambientales a considerar están el lograr un adecuado manejo de la fracción orgánica de los residuos sólidos transformándolos en gas, potencial generador de energía, y coque, que puede ser utilizado como combustible alternativo en industrias como la cementera con los mismos beneficios explicados en la alternativa de Co-procesamiento pero con una menor generación de emisiones contaminantes (Mutz et al., 2017).

#### **4.1.5.3 Aspectos financieros y económicos**

Los costos de operación y mantenimiento de este tipo de tecnología son bastante elevados si consideramos las condiciones de pretratamiento que deben aplicarse a los residuos, cuando no hay adecuados procesos de separación en la fuente, caso de Colombia, y la complejidad tecnológica del procedimiento (Mutz et al., 2017).

En países en vía de desarrollo la viabilidad financiera y económica, de proyectos de este tipo, estará atada a conseguir buenos precios para los subproductos resultantes del proceso y a que el proyecto mismo se articule con otros ingresos propios de la cadena de la Gestión de Residuos Sólidos (Mutz et al., 2017).

Tal como se aprecia en la descripción anterior, la aplicación de cualquier tecnología tendiente al aprovechamiento de los Residuos Sólidos Municipales para la generación de energía debe contemplar y considerar diferentes aspectos, que se pueden resumir en aspectos técnicos, ambientales y económicos.

En consecuencia, es necesario entender lo que representan cada uno de los aspectos previamente indicados y contar con herramientas que permitan realizar la valoración de los mismos como parte de la metodología para evaluar la viabilidad o no de la implementación de tecnologías WtE dentro de la Gestión de Residuos Sólidos Municipales.

## 5. Capítulo. 5. Aspectos por considerar para la evaluación de proyectos de WtE

Para determinar los aspectos más relevantes para la evaluación de proyectos WtE en el territorio nacional colombiano, se acudió a realizar una encuesta con directivos y líderes de empresas dedicadas a la prestación de servicios de saneamiento básico y manejo de residuos. Con base en la información obtenida del documento *Waste-to-Energy Options in Municipal Solid Waste Management* (2017), se contemplaron las tecnologías WtE y los aspectos de evaluación a consultar en la encuesta planteada. En consecuencia, se elaboró una encuesta en Google Forms, incluyendo 9 preguntas de la siguiente manera.

### Encuesta:

## Evaluación proyectos de generación de energía a base de residuos (Waste to Energy - WtE)

El presente cuestionario es una herramienta dentro del desarrollo de un trabajo de grado, para optar a la Maestría de Administración de la Universidad Nacional y solo tiene fines académicos. Agradezco mucho su tiempo y colaboración sobre el particular.

1. ¿Cuál es el nombre de su empresa? (opcional)

---

2. ¿En qué actividad se desarrolla el trabajo de su empresa?

\_\_\_ Servicios públicos: agua, saneamiento básico

\_\_\_ Servicios públicos: energía, gas

Manejo de residuos especiales

Sector hidrocarburos y minería

Otro: \_\_\_\_\_

3. ¿Cuál es su cargo dentro de su empresa?

Gerencia general o de área

Dirección de área

Coordinación de área

Jefatura de área

Líder de área

Otro: \_\_\_\_\_

4. ¿De cuánto tiempo ha sido su experiencia en el sector de saneamiento básico o de manejo de residuos?

De 0 a 2 años

De 3 a 5 años

De 6 a 10 años

Más de 10 años

5. ¿Esta familiarizado con el término Waste to Energy (WtE) o generación de energía a base de residuos?

Si

No

6. El término Waste to Energy (WtE) se refiere básicamente a tecnologías para tratar residuos con el fin de recuperar energía de diferentes maneras, en forma de calor, electricidad o combustibles no convencionales. Teniendo en cuenta lo anterior y su experiencia en el sector ¿Considera que la tecnología WtE es una alternativa que se podría implementar dentro de la Gestión de los Residuos Sólidos en Colombia?

Si

No

No tengo certeza

7. ¿Considera que existen herramientas o metodologías para evaluar la viabilidad de este tipo de proyectos en Colombia?

Si

No

No tengo certeza

Contesté negativamente la pregunta anterior

8. ¿Conoce tecnologías WtE, ¿Cuál de las siguientes reconoce? Marque todas las que considere:

Incineración

Pirólisis/Gasificación (RDF)

Co-procesamiento

Digestión anaeróbica para generación de biogás

Captura de gas en los rellenos sanitarios

No conozco

Otro: \_\_\_\_\_

9. Desde el punto de vista de la evaluación de proyectos WtE, califique los siguientes factores según la importancia que considera debería tenerse en cuenta al momento de dicha evaluación, siendo 4 el de mayor importancia y 1 el de menor:

Factor Ambiental	1___	2___	3___	4___
Aspecto Financiero	1___	2___	3___	4___
Aspecto Social	1___	2___	3___	4___
Aspecto Técnico	1___	2___	3___	4___

10. Consideraría de utilidad una metodología (procedimiento paso a paso) para evaluar, de manera integral, la viabilidad de proyectos WtE en el territorio colombiano:

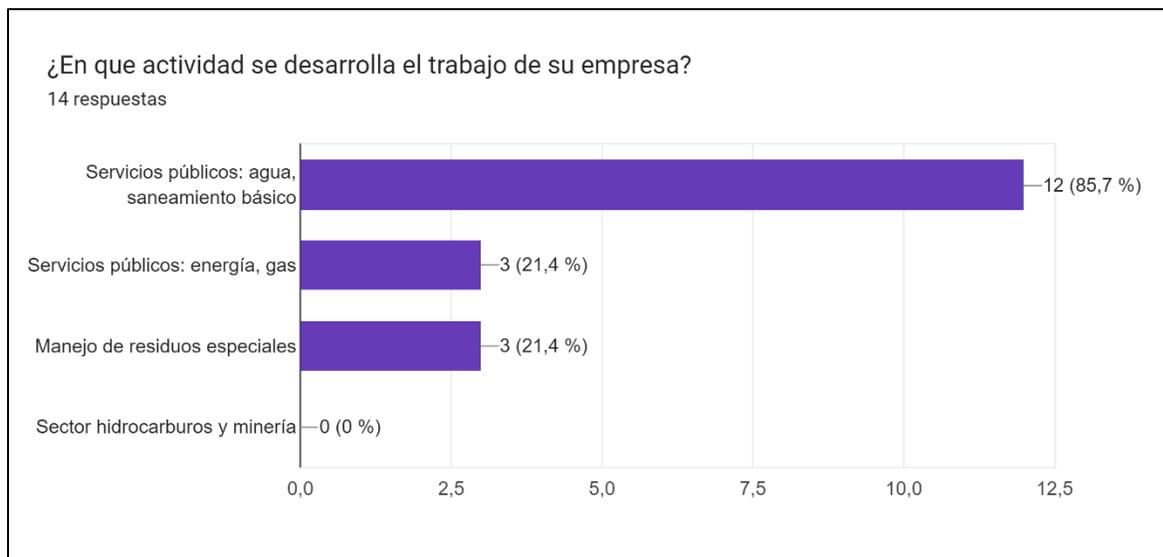
Si

\_\_\_ Si, pero ya cuento con esta herramienta

\_\_\_ No

Se obtuvo respuesta de 14 encuestados y los resultados del sondeo-encuesta realizado fueron los siguientes.

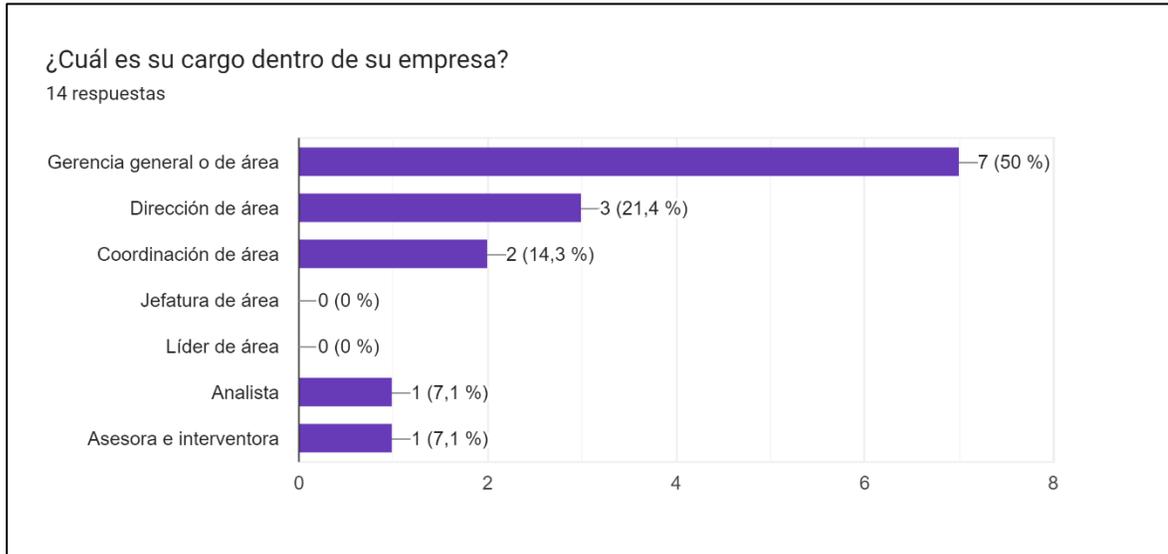
**Figura 5-1:** Respuestas pregunta 2 de encuesta



Nota. Fuente: elaboración propia. Esta figura muestra la actividad económica a la que pertenecen las empresas donde labora las personas encuestadas.

De la Figura 5-1 se encuentra que más del 85% de los encuestados que respondieron el cuestionario pertenecen al sector de saneamiento básico lo que representa una muestra con conocimientos de la problemática de la gestión de residuos sólidos. Que la cantidad de respuestas haya sido superior a la cantidad de encuestados se debe a que existen empresas que cuentan con diferentes líneas de negocios dentro del sector de servicios públicos domiciliarios y de servicios en general, para este caso uno de los encuestados trabaja en una empresa con participación en tres de las líneas de negocio consultadas y otros dos, en empresas con participación en dos de ellas.

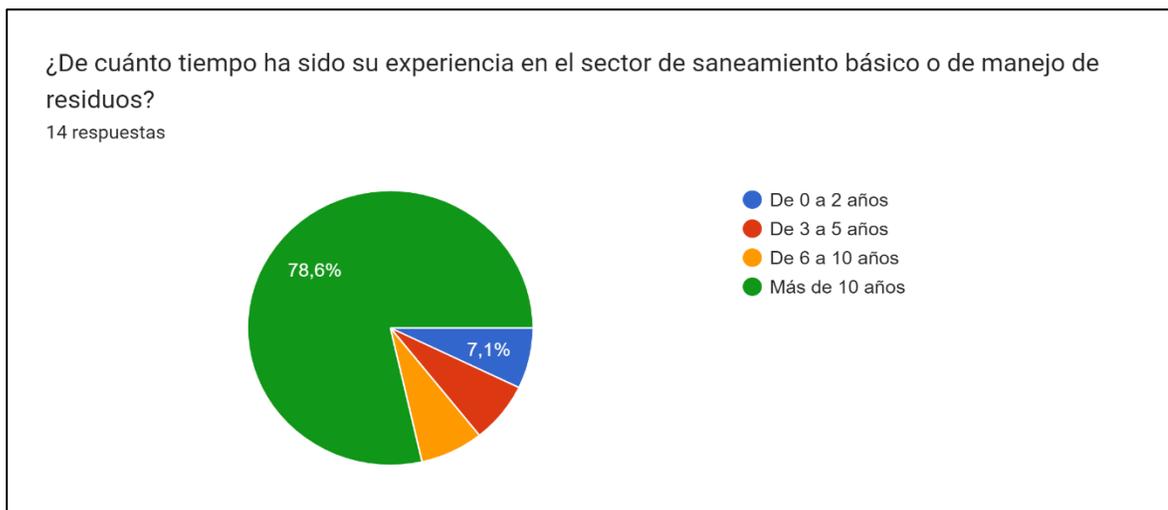
**Figura 5-2:** Respuestas pregunta 3 de encuesta



Nota. Fuente: elaboración propia. Esta figura muestra el cargo de las personas encuestadas en las empresas.

De la Figura 5-2 se resalta el hecho de que más del 85% de la muestra corresponde a cargos de dirección, como lo son gerentes, directores y/o coordinadores; con esto se tiene certeza que el criterio es de quienes lideran y dirigen este sector.

**Figura 5-3:** Respuestas pregunta 4 de encuesta

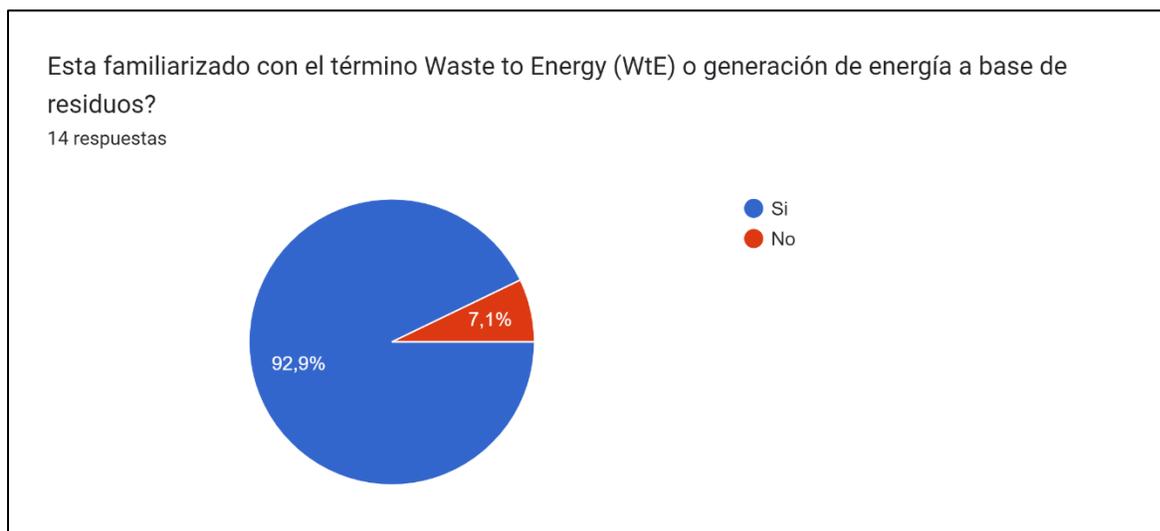


Nota. Fuente: elaboración propia. Esta figura muestra la experiencia de las personas encuestadas en el sector de GRSM.

De la mano con el rol que tienen los encuestados en sus empresas esta la experiencia en el sector, en donde más del 78% tienen experiencia de más de 10 años y un 7% de más

de 6 años, en total más del 85% de la muestra corresponde a funcionarios con una muy amplia experiencia en el sector.

**Figura 5-4:** Respuestas pregunta 5 de encuesta



Nota. Fuente: elaboración propia. Esta figura muestra el porcentaje de encuestados que conocen o no el termino WtE.

Las respuestas a la pregunta 5 indican que la tecnología WtE es ampliamente reconocida en el sector de GRSM.

**Figura 5-5:** Respuestas pregunta 6 de encuesta



Nota. Fuente: elaboración propia. Esta figura muestra que la tecnología WtE puede ser una

alternativa con alto grado de interés para el manejo de residuos.

Las respuestas a la pregunta 6 denota la relevancia con que se considera este tipo de alternativas para el manejo de los residuos sólidos.

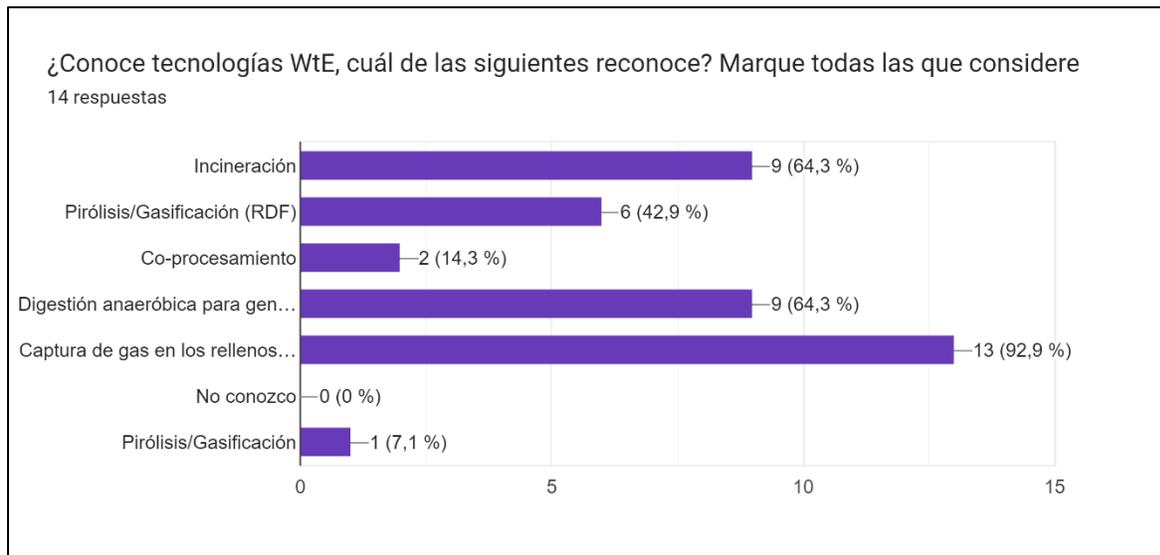
**Figura 5-6:** Respuestas pregunta 7 de encuesta



Nota. Fuente: elaboración propia. Esta figura muestra si los encuestados conocen metodologías para la evaluación de este tipo de proyectos.

No obstante que las tecnologías WtE son conocidas y consideradas como alternativas para el manejo y la GRSM, se puede observar que el 50% de los encuestados no tienen claridad o no conocen de la existencia de metodologías para evaluar la viabilidad de este tipo de proyectos, situación que va muy de la mano con el resultado de la revisión de bibliografía referenciada en el Capítulo 1, que indicaba que no existen muchos documentos sobre el particular.

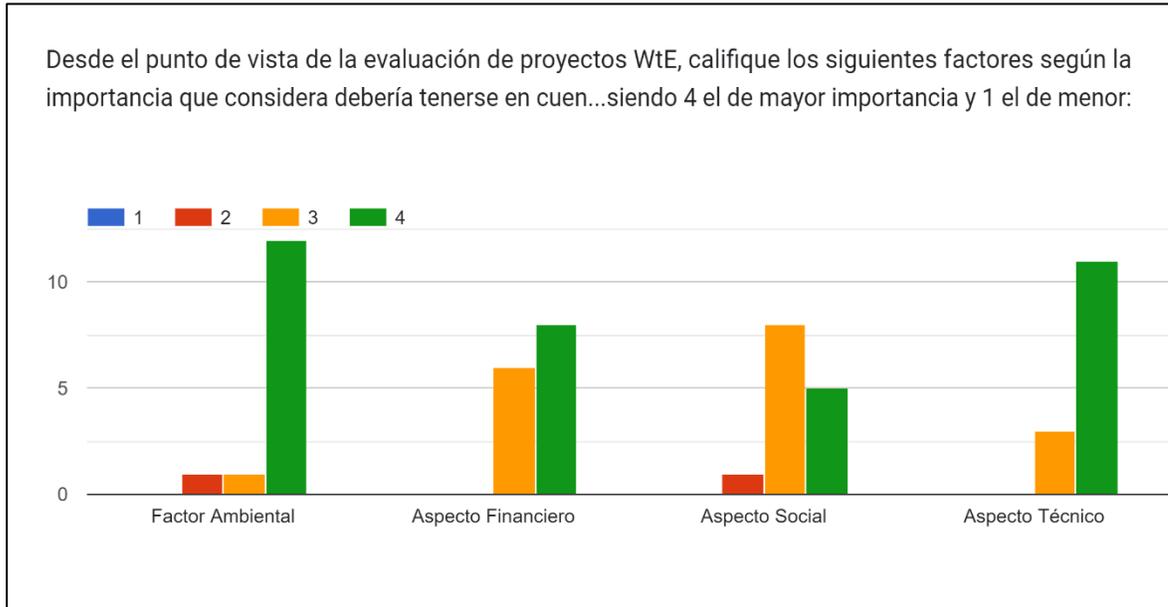
**Figura 5-7:** Respuestas pregunta 8 de encuesta



Nota. Fuente: elaboración propia. Esta figura muestra los tipos de tecnologías WtE y que tanto son reconocidas.

Aunque un alto porcentaje de los encuestados identifican el término WtE no están ampliamente familiarizados con las diferentes tecnologías existentes. El mayor conocimiento, más del 90% de los encuestados, es relacionado con la captura de gas en relleno sanitario, lo cual tiene sentido dado que, como se ha explicado a lo largo del documento, los rellenos sanitarios son la alternativa utilizada en Colombia para el manejo de los residuos sólidos.

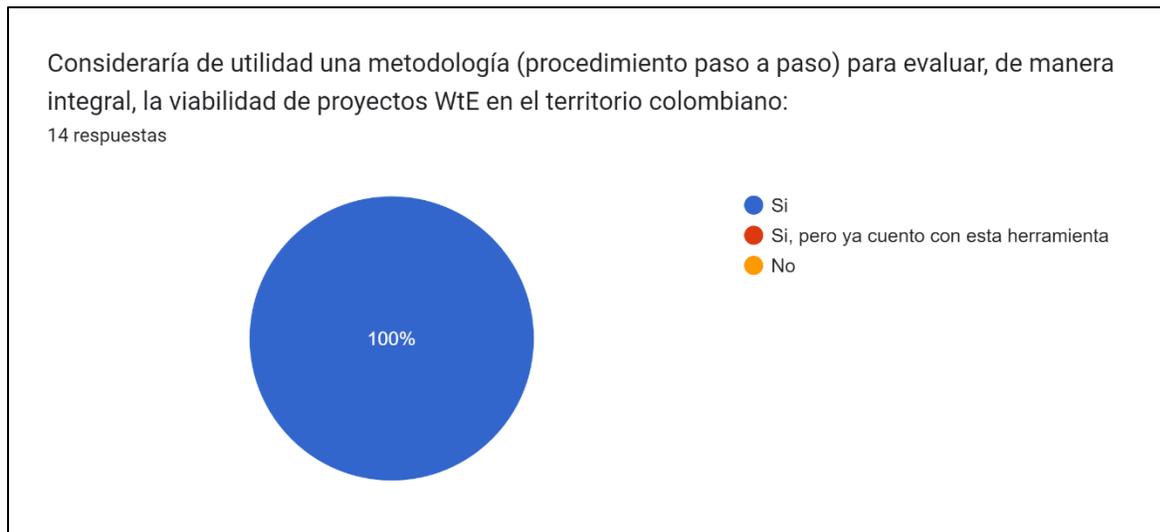
**Figura 5-8:** Respuestas pregunta 9 de encuesta



Nota. Fuente: elaboración propia. Esta figura nos muestra los factores que los encuestados consideran más importantes dentro de la evaluación de este tipo de proyectos.

De las respuestas para la pregunta 9, teniendo en cuenta que la encuesta fue contestada, en su gran mayoría, por funcionarios con una importante experiencia en el sector de saneamiento básico, se coincide con lo planteado por Demichelis et al. (2020) en su artículo *Technical, economic and environmental assesment of bioethanol biorefinery from waste biomass*, en donde se plantea una evaluación secuencial de los aspectos a evaluar, que para el caso del presente estudio coincide con que se inicie por el aspecto de menor relevancia hasta finalizar con el de mayor, es decir, la evaluación ambiental, aspecto considerado de mayor relevancia según el resultado de la encuesta. Realizar la evaluación de esta manera permitirá un análisis más completo de los proyectos, aspecto por aspecto de manera que, se consoliden los resultados de la viabilidad o no de cada tecnología y en caso de encontrar varias tecnologías viables, poder evaluar su mayor o menor aplicabilidad en la zona de estudio.

**Figura 5-9:** Respuestas pregunta 10



Nota. Fuente: elaboración propia. Esta figura nos muestra el interés de los encuestados en contar con una metodología de evaluación para este tipo de proyectos en Colombia.

Finalmente, con la Figura 5-9 se reitera la importancia y necesidad, para el 100% de los encuestados, de contar con una metodología que proporcione una herramienta de evaluación de viabilidad de este tipo de proyectos.

## 5.1 Evaluación de aspectos técnicos

En lo relativo al componente técnico se deben evaluar condiciones como el número de habitantes de la ciudad en evaluación, parámetro que está asociado directamente a la cantidad de residuos generados; y la composición de estos residuos, parámetro que permite establecer el potencial energético de los mismos (Leme et al., 2014a). En resumen, la finalidad de la evaluación del aspecto técnico consiste en definir las mejores alternativas tecnológicas dependiendo de la cantidad, tipo de residuos y sus características físicas y químicas.

La información relativa a la población del municipio o sitio de estudio debe ser obtenida directamente de fuentes oficiales, entendiéndose la alcaldía municipal o entidad que maneje la información estadística de censos poblacionales, en este caso el Departamento Administrativo Nacional de Estadística – DANE. En cuanto a la cantidad y condiciones de los residuos, se debe acudir al operador mismo del servicio público de aseo o al ente encargado de registrar este tipo de información, en este caso el ente de vigilancia y control,

es decir, la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios – SSPD. Se debe procurar utilizar la mayor cantidad de datos posibles para efecto de contar con datos representativos, no obstante, y dado que el reporte de información, sobre la disposición final de residuos, en Colombia es del 86.2% (SSPD, 2021), dependiendo de la municipalidad que se vaya a estudiar se trabajará con la información secundaria a la que se pueda acceder de manera abierta.

La evaluación técnica se realizará en dos fases, basándose en lo propuesto por Demichelis et al. (2020). La primera fase mediante la elaboración de un inventario de las tecnologías WtE reconocidas a nivel mundial y aplicables en el momento de la evaluación, de esta primera fase deberán escogerse las tecnologías que más se adapten a la cantidad y composición de residuos de la zona de estudio, utilizando el criterio CUMPLE o NO CUMPLE; para que una tecnología sea considerada como viable desde el punto de vista técnico deberá contar con la calificación CUMPLE para ambos criterios. La segunda fase de esta evaluación consistirá en organizar este listado de tecnologías WtE que cumplieron, conforme al tipo de combustible capaz de generar y la eficiencia medida en cantidad de combustible generado por tonelada de residuos utilizada.

Dado que las tecnologías en evaluación, en Colombia, han sido desarrolladas en casos aislados y por empresas del sector productivo de manera particular y en otros casos mediante desarrollos de proyectos pilotos (UPME Unidad de Planeación Minero Energética and INERCO Consultoría, 2018), la información utilizada para esta evaluación será la que se pueda obtener de los propietarios o desarrolladores de la dichas tecnologías o de los ejecutores de estos proyectos particulares o pilotos, en la medida que hayan hecho pública cierta información.

La información debe ser organizada y presentada en formato de matriz de manera que sean muy claros e ilustrativos los resultados. En primer lugar, se debe identificar el sitio de estudio y sus condiciones generales de ubicación, como se indica en la Tabla **5-1**. Esta información es absolutamente relevante dado que la ubicación del sitio determina las condiciones climáticas que predominan en la zona, estas condiciones pueden influir la implementación de diferentes tecnologías, siendo más o menos favorables para determinados procesos. La información demográfica determina la cantidad de residuos que se pueden llegar a generar en la municipalidad lo que también es un factor que

favorece o desfavorece las diferentes tecnologías. A continuación, y a manera ilustrativa se irán planteando las tablas que deben utilizarse para organizar y presentar la información de cada uno de los aspectos que serán evaluados en el desarrollo de la metodología y que serán diligenciadas en el estudio de caso.

**Tabla 5-1:** Información demográfica de la zona

<b>Localidad de estudio</b>	
<b>Municipio:</b>	
<b>Departamento:</b>	
<b>Población urbana (no. de hab):</b>	
<b>Población rural (no. de hab):</b>	
<b>Población total (no. de hab):</b>	
<b>Población atendida por el servicio público de aseo (no. de hab):</b>	
<b>Año del censo:</b>	
<b>Altura promedio (msnm):</b>	
<b>Temperatura mínima anual (°C):</b>	
<b>Temperatura máxima anual (°C):</b>	
<b>Temperatura media anual (°C):</b>	

Nota. Fuente: elaboración propia. Esta tabla permite identificar las condiciones demográficas del municipio donde se pretenda implementar tecnologías WtE.

Los datos relativos a la cantidad de residuos generados deben ser presentados de manera clara y precisa para su adecuado procesamiento, tal como se indica en el Tabla 5-2. Dado que los residuos son la materia prima y base para la operación de cualquiera de las tecnologías planteadas, su cantidad es uno de los factores más determinantes dentro de la evaluación de alternativas.

**Tabla 5-2:** Relación de la cantidad de residuos generados

<b>Residuos ordinarios generados</b>				
<b>Año</b>	<b>20XX</b>	<b>20XX</b>	<b>20XX</b>	<b>20XX</b>
<b>Residuos promedio mes (Ton/mes)</b>				
<b>Residuos promedio día (Ton/día)</b>				

Nota. Fuente: elaboración propia. Esta tabla permite identificar las cantidades de residuos generados en el municipio donde se pretenda implementar tecnologías WtE

Un punto muy importante es la caracterización o composición de los residuos, de manera que también deben ser presentados de una forma adecuada, como se plantea en la Tabla **Tabla 5-3**, en donde los campos de tipo de residuos son indicativos y podrán ser ampliados dependiendo del sitio de evaluación y en consecuencia del tipo residuo generado en el mismo.

**Tabla 5-3:** Caracterización fisicoquímica de los residuos generados

<b>Tipo de Residuo</b>	<b>%</b>
Orgánico	
Papel y cartón	
Plástico	
Textiles	
Madera	
Vidrio	
Metálicos	
Productos cerámicos y escombros	
Higiénico y sanitarios	
Icopor	

<b>Tipo de Residuo</b>	<b>%</b>
Otros	
<b>Total</b>	100%
<b>Porcentaje de Humedad (%)</b>	
<b>Poder calorífico (BTU/Ton)</b>	

Nota. Fuente: elaboración propia. Esta tabla permite realizar una clasificación de los residuos generados de acuerdo con las cantidades reportadas en la tabla anterior.

Es supremamente importante que esta caracterización de residuos incluya como mínimo los campos planteados en la Tabla 5-3. Sobre este punto es preciso considerar que la presente metodología representa una herramienta para las autoridades municipales y operadores asociados con la gestión de residuos sólidos por lo que debe haber disposición para que estos actores faciliten la consecución de esta información y es importante considerar este aspecto dado que la realización de este tipo de caracterizaciones, que implican unos costos, usualmente no es vista por los operadores del servicio de aseo como un procedimiento relevante y lo realizan por dar cumplimiento a una exigencia normativa más que como una herramienta para estructurar proyectos de gestión y tratamiento de residuos, sobre todo lo relacionado con el cálculo del poder calorífico que generalmente no se determina ya que no está dentro de los parámetros que exige la norma. Para el caso de los proyectos de WtE este parámetro, poder calorífico, es absolutamente relevante y necesario para direccionar la toma de decisiones adecuadas.

No obstante, lo anterior, las características de los residuos sólidos varían de acuerdo con las condiciones del medio al que están expuestos mientras son recogidos por el servicio de aseo, y aunque los valores resultantes de la caracterización reflejan un estado del momento en que se realizó el proceso, representan una referencia adecuada de la característica general de los residuos.

Teniendo claras las condiciones de la cantidad y composición de los residuos se debe proceder a la Fase 1 previamente planteada, relacionar las tecnologías WtE identificadas

indicando cuales se ajustan a la realidad del sitio en evaluación, como se indica en la Tabla 5-4.

**Tabla 5-4:** Relación de tipos de tecnologías por condiciones del área de estudio

Fase 1	Condiciones sitio de estudio	
Tecnología WtE	Cantidad de residuos generados al mes (CUMPLE/NO CUMPLE)	Composición de los residuos (CUMPLE/NO CUMPLE)
Incineración		
RDF		
Digestión Anaeróbica		
Captura de gas de los rellenos sanitarios		
Pirolisis/Gasificación		

Nota. Fuente: elaboración propia. Esta tabla permite identificar las tecnologías WtE que se pueden utilizar teniendo en cuentas las condiciones donde serian aplicadas.

De los resultados obtenidos de esta Fase 1, es decir, tomando las tecnologías que cumplieron el criterio en ambas condiciones se procede con la Fase 2, en donde con esta o estas tecnologías que cumplieron se elabora el cuadro de tipo de combustible y medio para distribución del producto, tomando la información secundaria obtenida de estudios desarrollados sobre el tema, del desarrollador de la tecnología y/o la información que sea pública para implementadores en el territorio colombiano, de acuerdo a lo indicado en el Tabla 5-5.

**Tabla 5-5:** Tipos de tecnologías WtE y sus condiciones de uso

Fase 2	Condiciones de la tecnología
--------	------------------------------

Tecnología WtE	Tipo de combustible generado	Medio de transporte para distribución del tipo de energía generado
Incineración		
RDF		
Digestión Anaeróbica		
Captura de gas de los rellenos sanitarios		
Pirolisis/Gasificación		

Nota. Fuente: elaboración propia. Esta tabla permite identificar las condiciones de las tecnologías WtE que se pueden utilizar.

De los datos diligenciados en la Tabla **5-5** obtendrá información muy importante para considerar dentro del siguiente paso de la metodología de evaluación, en cuanto al costo/beneficio de cada tecnología en la medida que el tipo de combustible o energía generada y su forma de distribución incidirá directamente en los costos asociados a su generación. Esta información servirá para evaluar si la tecnología es coherente o se acopla con las necesidades de la zona en donde se pretende implementar, es decir, si el tipo de combustible generado tiene demanda en la zona y la forma de distribuirlo tiene viabilidad en cuanto a la infraestructura existente en el sitio, para este último caso particularmente el tener que implementar infraestructura para esta distribución haría inviable el proyecto por sí solo.

## 5.2 Evaluación de aspectos económicos y financieros

### 5.2.1 Evaluación de aspectos económicos

La evaluación económica aplica para determinar condiciones previas a la implementación del proyecto y condiciones de desarrollo de este. En lo correspondiente a la evaluación de la etapa previa se debe tener en cuenta que, la definición de un sistema WtE requiere de una caracterización clara de los RSM generados en determinada localidad, a nivel de composición (plástico, papel, orgánicos biodegradables, etc.), una estimación de cantidad de toneladas que serán generadas a lo largo de la vida útil del proyecto, la distribución de estos residuos en esta localidad y general variables que están determinadas por la economía local del sitio en donde se busca la implementación del proyecto. Estas variables ya están siendo consideradas en la evaluación de aspectos técnicos, es decir, las condiciones económicas del sitio de estudio se verán reflejadas e influirán en la determinación de las mejores alternativas tecnológicas entendiéndose como las de mayor viabilidad dadas las condiciones económicas del lugar.

Respecto a las condiciones de desarrollo del proyecto la evaluación se realiza en términos de sostenibilidad dentro del sector, para este caso el sector de residuos, considerando el posible desarrollo de nuevas empresas y tecnologías, la accesibilidad a energías limpias que el proyecto pueda generar, la valorización de materiales anteriormente considerados como residuos y el ahorro que pueda propiciar al minimizar la cantidad de residuos no aprovechables (Cucchiella et al., 2017a). En este sentido el análisis o evaluación económica consiste en estudiar los beneficios sociales o costos (afectaciones), tanto por efecto directo o por externalidades<sup>3</sup>, que cualquier proyecto puede llegar a generar y significar un costo-beneficio favorable (European Commission, 2015).

Para estos fines se utilizará una matriz, de orden cualitativo, en donde se comparen las tecnologías que se tengan viabilizadas, al momento, sometiéndolas a la evaluación del nivel de generación de beneficios o costos de diferentes aspectos, se toman los aspectos planteados en el artículo *Sustainable waste management: Waste to energy plant as an alternative to landfill* de Cucchiella et al. (2017): **i) desarrollo de nuevas empresas o negocios**, que se refiere a lo que la tecnología significa respecto a la creación de nuevas

---

<sup>3</sup> Las externalidades se refieren a esos costos (afectaciones) o beneficios que son originados por el proyecto, influenciando a otros actores sin que exista, por parte de estos, ninguna retribución o compensación monetaria (European Commission, 2015).

oportunidades de negocios, diferentes a los existentes en el sitio de estudio; ii) **desarrollo de nuevos empleos** reflejado en las oportunidades laborales, de mano de obra calificada y no calificada, que represente la implementación de cada tecnología, iii) **emisiones de contaminantes** que se generen de la operación o funcionamiento de cada tecnología, en donde el beneficio es inversamente proporcional a la cantidad de emisiones que genere la misma, es decir, menores cantidades de emisiones significará altos beneficios así como mayores cantidades significarán bajos beneficios; iv) **valoración de materiales potencialmente recuperables** como un valor agregado al desarrollo del objeto principal de la tecnología y v) **reducción de costos en disposición final de residuos** lo que para el caso colombiano significa una posible reducción en la utilización del sistema de enterramiento en rellenos sanitarios. Cada aspecto se evaluará, para cada tecnología, utilizando el criterio bajo, medio o alto, según sea el caso utilizando la Tabla 5-6.

**Tabla 5-6:** Matriz de comparación de alternativas viabilizadas

Factores Económicos										
Tecnología WtE	Desarrollo de nuevas empresas o negocios		Desarrollo de nuevos empleos		Emisiones de contaminantes		Valoración de materiales potencialmente recuperables		Reducción de costos en disposición final de residuos	
	Beneficio	Costo (Afectación)	Beneficio	Costo (Afectación)	Beneficio	Costo (Afectación)	Beneficio	Costo (Afectación)	Beneficio	Costo (Afectación)
Incineración										
RDF										
Digestión Anaeróbica										
Captura de gas de los rellenos sanitarios										
Pirólisis/Gasificación										

Nota. Fuente: elaboración propia. Esta matriz permite comparar las tecnologías WtE desde diferentes factores para evaluar su aplicabilidad.

Para lograr criterios que permitan evaluar cada tecnología se puede recurrir a la

información obtenida de estudios previos sobre el tema, la proporcionada por el fabricante y/o también a los criterios que considere el equipo de evaluación de la empresa, organización o entidad que aplique la metodología.

Valoraciones bajas en beneficios y altas en los costos no representarán de manera directa la exclusión de las tecnologías evaluadas, pero en la medida que más de un factor económico presente condiciones adversas será el criterio del (los) evaluador (es), decidir si descartar o no, en este punto, y determinar las tecnologías que continuará evaluando en los demás aspectos definidos en la presente metodología.

### **5.2.2 Evaluación de aspectos financieros**

Por otro lado, la evaluación financiera consiste en realizar un análisis del comportamiento de las finanzas (flujo) del proyecto, para lo cual, lo más común es el análisis de sensibilidad o variación de condiciones del proyecto para observar cómo se comportan los parámetros financieros más significativos, como el Flujo de Caja, el Valor Presente Neto (VPN), la Tasa Interna de Retorno (TIR), que afecten la viabilidad del proyecto (Leme et al., 2014a). En el mismo sentido, y buscando utilizar las proyecciones financieras para tomar decisiones sobre el proyecto, también suele utilizarse la metodología de Flujo de Caja Descontado utilizando, como se indicó anteriormente, índices de referencia el VPN, TIR y el Periodo de Amortización con Descuento Financiero (PADF) (Cucchiella et al., 2017a).

De esta manera se debe construir una proyección de costos y gastos o presupuesto estimado con base en la información que sea proporcionada por el desarrollador de la tecnología en cuanto a costos de inversión (CAPEX) de los equipos que componen la tecnología misma y costos de operación (OPEX) que involucra y requiere dicha tecnología para su adecuada operación. Los costos de operación estarán en función de cantidades de insumos, consumibles, energía, cantidad de personal y nivel de preparación, etc., de manera estas cantidades sean asociadas a los costos particulares para esos elementos o insumos en la zona objeto de la evaluación y al momento de realizar la misma.

Este tipo de proyectos implican un análisis particularmente especial de los costos de operación, dado que se ha observado que organizaciones de todo tipo ofrecen alternativas de tecnologías con aportes a la inversión, por parte de diferentes actores como algunos países desarrollados, que son bastante atractivos para llevar a cabo su implementación, no obstante, que es igual o más importante el sostenimiento del proyecto a lo largo del tiempo y de manera autónoma (Correal et al., 2023).

La proyección será realizada a 20 años, considerando este mismo periodo de tiempo de vida útil de la tecnología (Demichelis et al., 2020) y se utilizará como estructura de la proyección lo indicado en la Tabla 5-7:

**Tabla 5-7:** Proyección de costos de operación en 20 años

	<b>Año 0</b>	<b>Año 1</b>	<b>Año 2</b>	<b>....</b>	<b>Año 20</b>
<b>INGRESOS</b>					
<b>COSTOS FIJOS</b>					
<b>COSTOS VARIABLES</b>					
<b>Utilidad Bruta</b>					
<b>Margen Bruto</b>					
<b>GASTOS FIJOS</b>					
<b>GASTOS ADMON</b>					
<b>Utilidad Operativa</b>					
<b>Margen Operativo</b>					
<b>INTERESES</b>					
<b>U ANTES DE IMP</b>					
<b>IMPUESTOS</b>					
<b>U NETA</b>					
<b>Margen Neto</b>					
<b>EBITDA</b>					

<b>I CTTRABAJO</b>					
<b>AMORTIZACION K</b>					
<b>FL NETO DE CAJA</b>					

Nota. Fuente: elaboración propia. Esta tabla permite verificar los costos proyectados del proyecto en un mínimo de 20 años.

Con base en esta información se deben obtener los indicadores financieros de sensibilidad básicos, para cada una de las tecnologías en evaluación, dentro de los que se encuentran los indicados previamente, tal como se indica en el Tabla 5-8. Se hace un recuento básico de lo que representa cada indicador, de acuerdo con García Serna (2009), de manera que se tenga claridad que refleja en términos generales cada valor obtenido. Para el cálculo de los indicadores se podrá utilizar cualquier hoja de cálculo o calculadora financiera:

- **VPN (Valor Presente Neto)** = es la diferencia entre el valor presente de los flujos generados por el proyecto y la inversión inicial, un proyecto es rentable cuando esta diferencia es mayor a cero.
- **TIOPROYECTO (Tasa Interna de Oportunidad del Proyecto)** = rentabilidad mínima que se le debe exigir a un proyecto de manera que sea más rentable que otro tipo de inversión del mercado.
- **TIR (Tasa Interna de Retorno)** = corresponde a la tasa de interés mediante la cual los ingresos se igualan a los egresos de un proyecto y representa una tasa de referencia sobre la posible rentabilidad o no el proyecto.
- **Relación BC (Relación Beneficio Costo)** = es la relación entre el VPN y la inversión total a precios actuales, que indica cuanto ingreso generó la inversión realizada.
- **PayBack** = corresponde al número de periodos requerido para recuperar la inversión inicial.
- **Margen Bruto (promedio)** = refleja el beneficio que se obtiene directamente de los ingresos por ejecutar un servicio o vender un bien.
- **Margen Operativo (promedio)** = representa la utilidad operativa sobre las ventas, lo que indica si un negocio es lucrativo o no en sí mismo.
- **Margen Neto (promedio)** = indica el porcentaje de utilidad neta sobre las ventas o ingresos y refleja la rentabilidad de un negocio.

**Tabla 5-8:** Relación de indicadores

INDICADOR	VALOR
VPN	
TIOPROYECTO	
TIR	
Relación BC	
PayBack	
Margen Bruto (prom)	
Margen Operativo (prom)	
Margen Neto (prom)	

Nota. Fuente: elaboración propia. Información relacionada con los indicadores financieros.

Teniendo calculados los indicadores financieros para cada una de las tecnologías que hayan sido viabilizadas en la evaluación de aspectos técnicos y económicos, se elaborará un cuadro o matriz, ver Tabla 5-8, para poder comparar los comportamientos de cada una de las tecnologías respecto a la realidad del sitio de evaluación.

**Tabla 5-9:** Comportamientos por tipo de tecnología en los sitios de evaluación

Indicadores Financieros	Tecnología WtE		
	Tecnología 1	Tecnología 2	Tecnología n
VPN			
TIOPROYECTO			
TIR			
RELACIÓN BC			

<b>PayBack</b>			
<b>Margen Bruto (prom)</b>			
<b>Margen Operativo (prom)</b>			
<b>Margen Neto (prom)</b>			

Nota. Fuente: elaboración propia. Información de tipos de tecnologías en relación con los sitios donde serán aplicadas.

De este último análisis se definirá la o las tecnologías que pasaran a la evaluación de aspectos ambientales, aspecto que finalmente definirá la viabilidad o no del proyecto dada su mayor relevancia.

### 5.3 Evaluación de aspectos ambientales

Dentro de los procesos de evaluación de proyectos para la recuperación de energía utilizando los residuos sólidos municipales (WtE), la evaluación del aspecto ambiental reviste especial importancia, si se tienen en cuenta los impactos que se pueden llegar a generar. Es por lo anterior que las aproximaciones que se han hecho sobre el particular han analizado diferentes alternativas, llegando a encontrar que la metodología de Evaluación de Ciclo de Vida (Life Cycle Assessment - LCA) es de las más utilizadas, debido a que permite una evaluación integral del aspecto ambiental mediante la medición de los impactos ambientales potenciales que puede llegar a generar determinada tecnología (Istrate et al., 2020).

LCA es una metodología sistemática, aplicable al análisis de productos y servicios, que permite medir y comparar impactos ambientales de actividades humanas, otorgando un vistazo general del perfil ambiental de diferentes tecnologías y un comparativo de los impactos ambientales generados por las mismas. Esta metodología está muy bien definida como ayuda para la toma de decisiones y evaluación de los sistemas de Gestión de Residuos Sólidos (Leme et al., 2014b). La aplicación de la metodología LCA evalúa los impactos durante todo el ciclo de un producto, proceso o servicio, es decir, desde su etapa de procesamiento de materia prima hasta su etapa final en donde se generan los residuos

propios del proceso (Özeler et al., 2006).

El objetivo de este trabajo no es calificar el sistema de Gestión de Residuos actual de determinado municipio, sino evaluar diferentes tecnologías de WtE para determinar cuál de ellas ofrece las mejores condiciones o menores afectaciones, en este caso en términos ambientales. Por consiguiente, se debe definir una referencia que permita evaluar estas tecnologías de manera que, las valoraciones sean comparables. Conforme a lo anterior y teniendo en cuenta, como se mencionó previamente, que esta metodología contempla evaluar como las tecnologías propuestas llegarán a afectar el ambiente, generando o no nuevos impactos, lo más adecuado es comparar el nuevo escenario o tecnología en proceso de evaluación, con la forma como se gestiona actualmente el manejo de residuos sólidos, en el sitio de estudio, de manera que esto último sería el punto de referencia a partir del cual se calificarán las diferentes tecnologías WtE que se pretendan evaluar. Una forma simple de realizar esta evaluación es aplicando la siguiente **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (Istrate et al., 2020):

Ecuación (5-1)

$$\frac{IA_{WtE} - IA_{FA}}{IA_{FA}}$$

En donde,

$IA_{WtE}$  = Impacto Ambiental de la tecnología WtE propuesta

$IA_{FA}$  = Impacto Ambiental de la Forma Actual de gestión de residuos

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** básicamente permite, a partir de una valoración de referencia para cada Impacto Ambiental (IA), estimar cuanto puede llegar a incrementarse o disminuirse la afectación ambiental por la utilización de determinada tecnología WtE para la gestión de los RSM, esto en relación con el manejo utilizado en el momento de la evaluación.

Una forma práctica de realizar esta evaluación es utilizando el ciclo PHVA (Planear-Hacer-

Verificar-Actuar), que se ha dado a conocer principalmente en las normas internacionales ISO, donde el modelo promueve un proceso interactivo que busca la mejora continua independientemente del tipo de organización; para el caso de los sistemas de gestión ambiental tenemos las siguientes definiciones y el siguiente modelo (ISO, 2015):

1. **Planear:** establece todos los objetivos ambientales y los procesos necesarios para conseguir resultados de acuerdo con la política ambiental de la empresa.
2. **Hacer:** implantar los procesos como se encontraba prevista.
3. **Verificar:** establece procesos de seguimiento y medir la política ambiental, incluyendo los compromisos, los objetivos ambientales y los criterios de operación.
4. **Actuar:** establecer decisiones para mejorar de forma continua.

**Figura 5-10:** Modelo de sistema de gestión ambiental basado en el ciclo PHVA



Nota. Fuente: Norma Técnica Internacional ISO 14001. Esta figura nos muestra el ciclo PHVA para un Sistema de Gestión Ambiental basados en las normas ISO.

De acuerdo con lo anterior y con base en la norma internacional ISO14001 los procesos son susceptibles de contar con un análisis adicional que este caso será la Evaluación de Ciclo de Vida donde se podrá observar con mayor detenimiento los impactos que son generados por cada una de las tecnologías que, como resultado de la evaluación realizada en el presente proyecto lograron llegar hasta esta etapa.

Si bien es cierto que la norma ISO14001 proporciona 5 herramientas para realizar Evaluación de Ciclo de Vida existe una norma internacional específica para este tipo de análisis, por tal razón esta será la que se utilizará para la evaluación de los procesos. Esta norma es la ISO14040/2006 (2006), norma internacional que utiliza una metodología de evaluación ambiental que permite analizar y cuantificar los aspectos ambientales e impactos potenciales de un producto o servicio a lo largo de su ciclo de vida, es decir, de todas las etapas de su existencia.

La norma invita a las organizaciones a contar con una metodología en la que se identifica como sus productos y servicios son diseñados, fabricados, distribuidos, consumidos y eliminados permitiéndole reconocer y comprender como trascienden sus impactos en estas fases y como puede evitarlos, minimizarlos y/o controlarlos.

De acuerdo con la norma ISO 14040, para llevar a cabo el análisis de los aspectos e impactos ambientales potenciales a lo largo del ciclo de vida de un producto o servicio se deben realizar las siguientes actividades (ISO, 2006):

1. Definir objetivos y alcance de la evaluación: para el caso particular del presente trabajo busca evaluar diferentes tecnologías WtE determinando un ranking de tecnologías en cuanto a la mayor o menor afectación que generen al ambiente, lo que indicaría cual o cuales tienen mayor viabilidad para ser implementadas
2. Identificar y cuantificar a modo de inventario las entradas y salidas notables del sistema y que puedan un impacto durante el análisis: dependerá de los evaluadores la profundidad en esta identificación de manera que la evaluación sea más o menos profunda

3. Evaluar los potenciales impactos ambientales asociados con las entradas y salidas identificadas en la fase anterior: identificar los impactos ambientales debe ir de la mano con la normatividad ambiental que regule el sitio de evaluación.
4. Interpretar los resultados de las fases 1 y 2 de acuerdo con los objetivos del estudio, de manera que se generen conclusiones y recomendaciones para la toma de decisiones.

Para el presente estudio se plantean las siguientes tablas para el desarrollo de la actividad de evaluación.

**Tabla 5-10:** Inventario de entradas y salidas del sistema

<b>ENTRADAS</b>	Elemento 1
	Elemento 2
<b>SALIDAS</b>	Elemento 1
	Elemento 2

Nota. Fuente: elaboración propia. Esta tabla permite relacionar el inventario de elementos de entradas y salidas del sistema que serán analizados uno a uno posteriormente

**Tabla 5-11:** Análisis de impactos y resultados

<b>Datos del Inventario</b>		<b>Impacto Ambiental</b>	<b>Conclusiones y Recomendaciones de la Evaluación</b>
<b>ENTRADAS</b>	Elemento 1		
	Elemento 2		
<b>SALIDAS</b>	Elemento 1		
	Elemento 2		

Nota. Fuente: elaboración propia. Esta tabla analiza los elementos del inventario relacionados en las entradas y salidas del proceso, su impacto ambiental y las conclusiones y/o recomendaciones.

El análisis de la generación de impactos será evaluado abordando los diferentes elementos del inventario de entradas y salidas del sistema, de acuerdo con la tecnología en evaluación. A partir de los impactos obtenidos en el ejercicio se considerarán las diferentes recomendaciones frente a dicha alternativa y se realizarán las respectivas conclusiones que serán una importante guía para la aplicabilidad o no de una u otra tecnología, según los resultados conseguidos en el análisis de impactos y resultados.

Finalmente, con todo lo analizado en esta etapa de la metodología, la evaluación de aspectos ambientales reviste gran importancia ya que es en este punto donde se toma la base teórica para aplicar el modelo y a través de este, evidenciar si las tecnologías desarrolladas permiten su utilización con la menor generación de impactos posible.

El presente trabajo plantea una metodología para ayudar en la toma de decisiones mediante la evaluación de diferentes tecnologías WtE sin que sea posible obviar el trámite legal y ambiental establecido por la normatividad vigente, esto significa que para la implementación efectiva del proyecto se debe realizar el proceso de licenciamiento ambiental (Decreto 1076, 2015). Es por esta razón que se considera de gran importancia plantear y analizar el medio social en esta etapa, de tal manera que se incluyan componentes como el demográfico, territorial, cultural, político administrativo, entre otros; lo anterior teniendo en cuenta la realización de los siguientes procedimientos apoyados en la Metodología General para la Elaboración y Presentación de Estudios Ambientales (2018):

- Caracterización del medio socioeconómico
- Análisis del área de influencia del proyecto
- Participación y socialización con las comunidades
- Evaluación económica ambiental
- Planes de compensación

## **5.4 Evaluación de tecnologías**

La metodología desarrollada proporcionará, en primera medida, un listado depurado de las tecnologías evaluadas con la posibilidad de plantear una o varias tecnologías como viables para implementar dentro del proceso de GRSM de una localidad particular, sin embargo,

también es posible que arroje que ninguna de las tecnologías cumple con todos los criterios para considerarse viable, en cuyo caso podrá hacerse una revisión de la información asociada a cada tecnología y en caso de obtener información adicional o más específica será el criterio del evaluador o equipo evaluador, quien defina si se vuelve a aplicar el proceso de evaluación siguiendo la metodología para validar los resultados.



## **6. Capítulo 6. Aplicación de la metodología: caso municipio de Soacha-Cundinamarca**

Utilizar el municipio de Soacha para aplicar la metodología planteada significa utilizar un municipio que refleja las grandes problemáticas sociales que aquejan a gran parte de la población colombiana, pero también es aproximarse a comunidades pujantes que buscan mejores condiciones y futuro para sus familias. De acuerdo con lo anterior la aplicación de la metodología está pensada como una herramienta que ayude a plantear alternativas para ayudar a mejorar las condiciones de vida en comunidades en general, pero sería más significativa y probaría mejor su efectividad su aplicación en comunidades y entornos complejos. Adicionalmente el municipio de Soacha cuenta con una población bastante significativa para una ciudad intermedia y en consecuencia una generación de residuos considerable.

Para la aplicación de la presente metodología solo se considerarán los residuos sólidos ordinarios generados en el municipio, es decir, los residuos con características no peligrosas que pueden ser manejados por los operadores del servicio público de aseo en condiciones normales (Decreto 1077, 2015). No obstante, la metodología podrá ser aplicada a todo tipo de residuos en la medida que las tecnologías WtE lo permitan.

Siguiendo la metodología previamente definida se debe iniciar con la evaluación en el orden planteado, como se observa a continuación.

### **6.1 Evaluación de aspectos técnicos**

Dentro de la evaluación de este primer aspecto, inicialmente se hace la identificación de las características más significativas del municipio de Soacha (Tabla **6-1**) para lo que se

acudió a la página web de la Alcaldía Municipal (Alcaldía Municipal de Soacha, 2020) y al Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos – PGIRS del Municipio de Soacha (PGIRS Decreto N° 421, 2016).

**Tabla 6-1:** Información demográfica del municipio de Soacha

<b>Localidad de estudio</b>	
<b>Municipio:</b>	Soacha
<b>Departamento:</b>	Cundinamarca
<b>Población urbana (no. de hab):</b>	640.143
<b>Población rural (no. de hab):</b>	5.062
<b>Población total (no. de hab):</b>	645.205
<b>Población atendida por el servicio público de aseo (no. de hab):</b>	640.143
<b>Año del censo:</b>	2018
<b>Altura promedio (msnm):</b>	2256
<b>Temperatura media (°C):</b>	11.8°

Nota. Fuente: Alcaldía Municipal de Soacha y PGIRS del Municipio. Esta tabla relaciona las condiciones demográficas del municipio de Soacha.

Continuando con el procedimiento se acude a la empresa operadora del servicio público de aseo en el municipio de Soacha, Urbaser Colombia S.A. E.S.P., al Sistema Único de Información de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios – SSPD (SUI, n.d.) y a la administración municipal (PGIRS Decreto N° 421 de 2016, 2016), para obtener los datos de toneladas de residuos generados en los últimos 6 años (Tabla 6-2) y la caracterización fisicoquímica de los mismos (Tabla 6-3).

Dentro del periodo de tiempo contemplado se debe tener en cuenta que los años 2020 y parte del 2021 estuvieron marcados por un confinamiento y en general afectaciones como consecuencia de la pandemia de COVID 19, situación que significó un incremento en los residuos generados en las ciudades cercanas a la ciudad de Bogotá, como lo es Soacha, por su condición de ciudades dormitorio a reducción en la generación de residuos (SSPD, 2021), como se puede observar en la Tabla 6-2.

**Tabla 6-2:** Relación de cantidad de residuos generados

<b>Residuos ordinarios generados</b>						
<b>Año</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>	<b>2021</b>
<b>Residuos promedio mes (Ton/mes)</b>	10.628	11.635	12.234	12.692	13.929	14.305
<b>Residuos promedio día (Ton/día)</b>	409	447	471	488	536	550

Nota. Fuente: Urbaser Colombia S.A. E.S.P., Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios y PGIRS del Municipio. Esta tabla permite identificar las cantidades de residuos generados en el municipio de Soacha, donde se evidencia que la mayor generación se produjo en el año 2021.

**Tabla 6-3:** Caracterización fisicoquímica de los residuos generados

<b>Tipo de Residuo</b>	<b>%</b>
<b>Orgánico</b>	54,7%
<b>Papel y cartón</b>	2,9%
<b>Plástico</b>	12,4%
<b>Textiles</b>	13,6%
<b>Madera</b>	0,8%
<b>Vidrio</b>	0,8%
<b>Metálicos</b>	0,2%

Tipo de Residuo	%
<b>Productos cerámicos y escombros</b>	0,4%
<b>Higiénico y sanitarios</b>	11,2%
<b>Icopor</b>	0,4%
<b>Otros</b>	2,6%
<b>Total</b>	100,0%
<b>Porcentaje de Humedad (%)</b>	32,4
<b>Poder calorífico (BTU/Lb)</b>	6287,18
<b>Poder calorífico (MJ/Kg)</b>	14,6

Nota. Fuente: Urbaser Colombia S.A. E.S.P., superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios y PGIRS del Municipio de Soacha. Esta tabla permite realizar una clasificación de los residuos generados de acuerdo con las cantidades reportadas en la tabla anterior.

En la Tabla **6-3** se observa, como era de esperarse de una ciudad de un país en vías de desarrollo y con las características referidas previamente, que más del 50% de los residuos sólidos municipales en el municipio son de tipo orgánico.

Contando con la información general del municipio de Soacha y las características generales de la cantidad y composición de los residuos sólidos generados en esta localidad se procede con la Fase 1 de la evaluación del aspecto técnico. Esta primera fase, que representa la columna vertebral del desarrollo de la metodología, ya que es donde se definirán las tecnologías que serán objeto de la evaluación de viabilidad, tendrá que involucrar a proveedores de las diferentes tecnologías, que deberán aportar la información básica para la realización de esta evaluación. Sin embargo y dado que el presente trabajo no tiene fines comerciales sino académicos se recurrirá a la información genérica que de cada tipo de tecnología WtE ofrece el documento guía *Waste-to-Energy Options in Municipal Solid Waste Management* (2017) y que fueron presentadas en el marco teórico del presente documento.

Para cada tipo de tecnología tenemos las siguientes características generales, que como se indicó anteriormente pueden variar dependiendo del desarrollo o mejoras que cada proveedor que se encuentre actualmente en el mercado le haya podido imprimir al proceso.

## **6.1.1 Fase 1**

### **6.1.1.1 Incineración**

Para tener viabilidad de desarrollar esta tecnología se debe contar con al menos una cantidad de 100.000 Ton de residuos sólidos por año para alimentar el sistema de incineración. Los residuos deben contar con un mínimo poder calorífico (Lower Calorific Value - LCV) de en promedio de 7 MJ/Kg, para garantizar una combustión autosostenible. Ambas condiciones son superadas por los residuos sólidos municipales de Soacha, que tuvo una generación de residuos de más de 160.000 Ton entre los años 2020 y 2021; y que, de la Tabla **6-3**, se puede observar, que cuentan con un poder calorífico de 6.287 BTU/Lb lo que equivale a 14,6 MJ/Kg.

### **6.1.1.2 Co-procesamiento**

Dado que en esta primera fase se evalúa únicamente la viabilidad de la tecnología con base en la cantidad y composición (poder calorífico) de los residuos sólidos no se considerarán condiciones adicionales a esto, como posibles sobrecostos por el proceso previo de segregación o separación de algún tipo de residuos que no es objeto de este procedimiento. En términos generales no se tiene una restricción específica de la cantidad de residuos generados y la capacidad calorífica de estos, requerida para hacer viable el proceso, es de entre 10 y 15 MJ/Kg, es decir, los residuos sólidos de Soacha cumplen.

### **6.1.1.3 Digestión anaeróbica**

Al igual que el caso del Co-procesamiento, para esta fase de evaluación, no se considerarán condiciones adicionales a la cantidad y composición de los residuos para determinar si dichos residuos, generados en el municipio de Soacha, cumplen para el

desarrollo de esta tecnología WtE, sin embargo, la cantidad de más de 150,000 Ton/año es una medida que cumple ampliamente cualquier viabilidad para este proceso.

Respecto a la composición el único requisito es contar con una fracción netamente orgánica, que para el caso de Soacha es de más del 50% del total de residuos generados, pero por otro lado no existe una restricción sobre el poder calorífico ni la cantidad de residuos generada.

#### **6.1.1.4 Captura de gas en rellenos sanitarios**

Este caso en particular no aplicaría para el municipio de Soacha dado que en esta localidad no se cuenta con esta infraestructura, la disposición de residuos sólidos municipales se realiza en el relleno sanitario Nuevo Mondoñedo que se encuentra ubicado en jurisdicción del municipio de Bojacá.

#### **6.1.1.5 Pirolisis/Gasificación**

Para esta tecnología se plantea una cantidad de residuos superior a las 150.000 Ton/año como cantidad ideal para hacer viable el procedimiento.

Respecto a la composición de los residuos lo ideal sería una buena separación en la fuente de las fracciones susceptibles del proceso de combustión, pero para esta fase de evaluación esto no es un factor descalificador y los residuos del municipio de Soacha cumplen con el poder calorífico mínimo requerido, de más de 8 MJ/Kg.

En la Tabla **6-4** se presenta el resumen de la caracterización realizada para cada una de las tecnologías WtE planteadas, observando que un tipo de tecnología es descartado del proceso de evaluación por no ser procedente para el municipio de Soacha, la tecnología correspondiente a *Captura de gas en relleno sanitario*, resaltada en rojo.

**Tabla 6-4:** Relación de tipos de tecnologías por las condiciones del área de estudio

<b>Fase 1</b>	<b>Condiciones sitio de estudio</b>	
<b>Tecnología WtE</b>	<b>Cantidad de residuos generados al mes</b>	<b>Composición de los residuos</b>
Incineración	CUMPLE	CUMPLE
Co-procesamiento	CUMPLE	CUMPLE
Digestión anaeróbica	CUMPLE	CUMPLE
Captura de gas en rellenos sanitarios	NA	NA
Pirólisis/Gasificación	CUMPLE	CUMPLE

Nota. Fuente: elaboración propia. Esta tabla permite identificar las condiciones de las tecnologías WtE que se pueden utilizar en este caso de estudio correspondiente al municipio de Soacha.

De este primer filtro, obtenido de la Fase 1, se continúa desarrollando la metodología con 4 de las 5 tecnologías planteadas inicialmente, sobre estas tecnologías WtE se procede con la Fase 2.

## 6.1.2 Fase 2

### 6.1.2.1 Incineración

Para esta tecnología el combustible generado por el proceso es el Gas de Combustión con el que se puede generar energía a través de calor y de vapor. El tipo de fuente de energía generado solo puede ser distribuido por medio de una red eléctrica.

### 6.1.2.2 Co-procesamiento

Esta tecnología genera lo que se conoce como Combustible Derivado de Residuos o por su definición en inglés RDF (Refuse Derived Fuel). El medio de distribución de esta fuente es a través de equipos de transporte terrestre.

### 6.1.2.3 Digestión anaeróbica

Con esta tecnología WtE se genera Biogás, que como se ha explicado a lo largo del presente documento, está compuesto principalmente por metano (CH<sub>4</sub>). El medio de distribución de este tipo de fuente de energía puede ser por medio gaseoducto o de red eléctrica, una vez generada la energía eléctrica.

### 6.1.2.4 Pirolisis/Gasificación

El objetivo de este tipo de tecnología es generar principalmente Syngas<sup>4</sup> (gas de síntesis) y carbón coque; elementos con los que se puede generar energía eléctrica, calor o alimentar procesos que funcionen con gas combustible. El proceso también puede generar sustancias líquidas como aceite. El medio de distribución para el tipo de energía a generar sería red eléctrica, gaseoducto y/o transporte terrestre, dependiendo del subproducto.

El resumen de esta evaluación se presenta utilizando los cuadros de apoyo y llevados, para esta Fase 2, en la Tabla 6-5.

**Tabla 6-5:** Tipos de tecnologías WtE y sus condiciones de uso

Fase 2	Condiciones de la tecnología	
Tecnología WtE	Tipo de combustible generado	Medio de transporte para distribución del tipo de energía generado
Incineración	Gas de combustión	Red eléctrica
Co-procesamiento	Combustible Derivado de Residuos - RDF (Refuse Derived Fuel)	Transporte terrestre

---

<sup>4</sup> Syngas: gas combustible sintético generado al someter a altas temperaturas elementos ricos en carbono (World Energy Council, 2016).

Fase 2	Condiciones de la tecnología	
Tecnología WtE	Tipo de combustible generado	Medio de transporte para distribución del tipo de energía generado
Digestión anaeróbica	Biogás	Red eléctrica Gaseoducto
Pirólisis/Gasificación	Syngas (gas de síntesis) Carbón coque Aceite	Red eléctrica Gaseoducto Transporte terrestre

Nota. Fuente: elaboración propia. Esta tabla permite identificar las condiciones de las tecnologías WtE que se pueden utilizar.

Conforme está establecido en la metodología en este punto se evalúan las condiciones de cada tecnología respecto a las condiciones y características del municipio de Soacha, como se explicó anteriormente Soacha es un centro industrial y colinda con uno de los sectores industriales de la ciudad de Bogotá, en este orden de ideas cuenta con la demanda de todas las fuentes de energía relacionadas en la Tabla 6-5, adicionalmente cuenta con un infraestructura vial que lo intercomunica con varios municipios de la región y con cobertura eléctrica adecuada, es decir, con redes eléctricas que interconectan el sistema (PGIRS Decreto N° 421 de 2016, 2016). En concordancia con lo anterior las 4 tecnologías en evaluación aplican para el municipio, respecto a este aspecto, y continúan al siguiente paso definido en la metodología.

## 6.2 Evaluación de aspectos económicos y financieros

Partiendo de los resultados de la evaluación de la etapa anterior se procede con el siguiente paso, iniciando con la evaluación de aspectos económicos. Nuevamente se debe considerar la información secundaria que se pueda obtener de empresas proveedoras del servicio, instituciones de investigación, autoridades estatales o casos de éxito que estén documentados. Para el caso puntual del presente trabajo se continuará utilizando el documento guía *Waste-to-Energy Options in Municipal Solid Waste Management Municipales* (2017).

## **6.2.1 Evaluación de aspectos económicos**

### **6.2.1.1 Incineración**

Esta tecnología requiere de mano de obra calificada por su alta complejidad, no obstante, la tecnología no propicia en una gran medida la generación de nuevas formas de negocio.

El proceso es un gran generador de emisiones contaminantes que implican altos costos en su control.

Los ingresos por materiales potencialmente recuperables, después del proceso no son significativos, de hecho, el proceso involucra la incineración de muchos de estos materiales.

Finalmente, no se reducen los costos en la gestión de los residuos sólidos dado que la tecnología significa costos más elevados en la disposición final de residuos respecto al sistema, de disposición en relleno sanitario, utilizado actualmente en Soacha.

### **6.2.1.2 Co-procesamiento**

El desarrollo de esta tecnología involucra la utilización de diferentes procesos previos para transformar los residuos sólidos municipales en Combustible Derivado de Residuos (RDF), lo que significa la posibilidad de nuevas oportunidades de negocios dentro de la cadena de producción, en consecuencia, también propiciaría la generación de nuevos empleos.

Respecto a la generación de emisiones contaminantes, aunque con la utilización de RDF se pretende reducir las mismas es una realidad que en todo el proceso, tanto de producción del RDF como de combustión de este material, se generan este tipo de emisiones y deben ser controladas mediante los elementos necesarios. Los procesos previos para transformar

los residuos sólidos en RDF permiten en gran medida la obtención de materiales potencialmente recuperables.

Respecto a los costos de disposición final de residuos esta tecnología representa mayores valores que los generados por la disposición en sistemas de enterramiento como el relleno sanitario.

### **6.2.1.3 Digestión Anaeróbica**

Dentro del desarrollo de esta tecnología se involucran diferentes actores, antes y después, de diferentes cadenas productivas, como restaurantes, plazas de mercado, granjas agropecuarias, etc; de esta manera la oportunidad de generar nuevas alternativas de negocios es alta y de la misma manera la generación de nuevos empleos.

En cuanto a las posibles emisiones, esta tecnología solo genera Biogás que será utilizado para la generación de energía por lo que desde todo punto de vista ayuda a reducir los gases de efecto invernadero. Dado que esta tecnología solo podría utilizar la fracción orgánica de los residuos municipales se deben adelantar procedimientos de separación o retiro de los demás materiales dentro de los cuales se obtendría una gran porción de materiales potencialmente recuperables.

Finalmente, los costos respecto al sistema actual de disposición final de residuos en Soacha inicialmente podrían ser menores salvo que se deben incluir procesos que ayuden a la separación de la fracción orgánica, de los residuos municipales, lo que implicaría mayores costos, no obstante estos procesos adicionales se podría suplir con campañas y jornadas educativas masivas y a gran escala para lograr la separación en la fuente por parte de las comunidades, situación menos costosa y más benéfica en términos sociales.

### **6.2.1.4 Pirólisis/Gasificación**

El desarrollo de esta tecnología implica la implementación de procesos complejos y complementarios por lo que se generarían oportunidades de nuevos negocios, de igual

manera esta situación requiere de personal altamente capacitado y también mano de obra de menor preparación.

La pirólisis se desarrolló como una tecnología alterna a la incineración que, por sus características técnicas, reducía considerablemente la generación de emisiones y contaminantes en general.

Respecto a la valoración de materiales potencialmente recuperables esta tecnología implica un proceso de separación previa de los residuos sólidos municipales del cual se obtendría una buena proporción de este tipo de materiales, adicionalmente los subproductos sólidos del proceso tienen una condición que les permitiría ser utilizados en procesos de construcción.

Por último, la complejidad de esta tecnología la hace la más costosa de las presentadas en el presente documento, de esta manera estaría muy por encima del costo de la actual tecnología de disposición final en el municipio de Soacha.

En la Tabla 6-6 se observa un resumen de la evaluación de los aspectos económicos para cada tecnología, se sombrearon en rojo los campos que significaron aspectos adversos, es decir, con nivel bajo en cuanto a beneficio o con nivel alto en cuanto a costo-afectación.

**Tabla 6-6:** Matriz de comparación de alternativas viabilizadas

Tecnología WtE	Factores Económicos									
	Desarrollo de nuevas empresas		Desarrollo de nuevos empleos		Emisiones de contaminantes		Valoración de materiales potencialmente recuperables		Reducción de costos en disposición final de residuos	
	Beneficio	Costo (Afectación)	Beneficio	Costo (Afectación)	Beneficio	Costo (Afectación)	Beneficio	Costo (Afectación)	Beneficio	Costo (Afectación)
Incineración	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto
Co-procesamiento	Medio	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	Alto	Alto	Bajo	Bajo	Alto
Digestión anaeróbica	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Medio	Medio	Medio
Pirólisis/Gasificación	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	Alto

Nota. Fuente: elaboración propia. Esta matriz compara las tecnologías WtE desde diferentes factores para evaluar su aplicabilidad en el municipio de Soacha.

Para el presente trabajo se toma la determinación de descartar las tecnologías de Incineración y Co-procesamiento, que marcan más de dos aspectos con niveles inconvenientes. La evaluación se continua con las tecnologías de Digestión Anaeróbica y Pirólisis/Gasificación.

## **6.2.2 Evaluación de aspectos financieros**

Siguiendo la metodología de evaluación se continua con la evaluación financiera de las dos tecnologías que se han viabilizado hasta el momento, en este punto también se debe recurrir a información secundaria pero lo más recomendable es recurrir inicialmente a la información o proyecciones que puedan aportar los proveedores y/o desarrolladores de cada tecnología, debido a que son ellos quienes deben tener actualizados los valores de costos, inversiones, etc. Sin embargo, sea cual sea la fuente la información debe ser ponderada por el evaluador o equipo evaluador para evitar la utilización de datos alejados de la realidad de mercado y financiera de la zona de estudio.

Para el presente trabajo se acude a la guía *Waste-to-Energy Options in Municipal Solid Waste Management* (2017) dado que recoge información de varias fuentes proporcionando datos de costos de inversión, operación y mantenimiento para países en vías de desarrollo; y al documento *Sostenibilidad financiera de la gestión de residuos sólidos en América Latina y el Caribe* (2023). Los datos obtenidos de estos documentos están asociados a la cantidad de toneladas objeto del procedimiento, recogen supuestos asociados a cada proceso. Para el caso del documento de Mutz et al. los valores se presentan en euros para el año 2017, por lo que se realiza una actualización a precios de 2021, año de referencia para efecto del presente estudio, utilizando la inflación en Europa, región desde donde se origina el estudio, tomada de la página web del Banco Mundial (2023).

Teniendo en cuenta lo anterior, para este caso específico se realizará la proyección financiera utilizando costos por tonelada de RSM procesada, dado que finalmente son los residuos mismos el insumo o materia prima del proceso.

Para los datos de la cantidad de toneladas o materia prima que será utilizada dentro del proceso y valores para el cálculo de ingresos se acudirá a la información vigente para la localidad de Soacha, es decir, se tomará el promedio anual de los últimos dos años sobre

los que se tiene registro oficial en el sistema de la SSPD, para este caso los años 2020 y 2021. Dado que este es un ejercicio académico que busca desarrollar la aplicación de una metodología los valores de costos se tomarán como ajustados a la realidad de la localidad, para el caso de los ingresos se tomarán los valores estimados por el documento de referencia y complementado por valores del mercado local.

### 6.2.2.1 Digestión Anaeróbica

Para estimar los costos de esta tecnología de inversión y operación para esta tecnología se comparan los datos de los dos documentos de referencia mencionados anteriormente, obteniendo la siguiente información:

**Figura 6-1:** Costos asociados a la inversión en el proceso de digestión anaeróbica

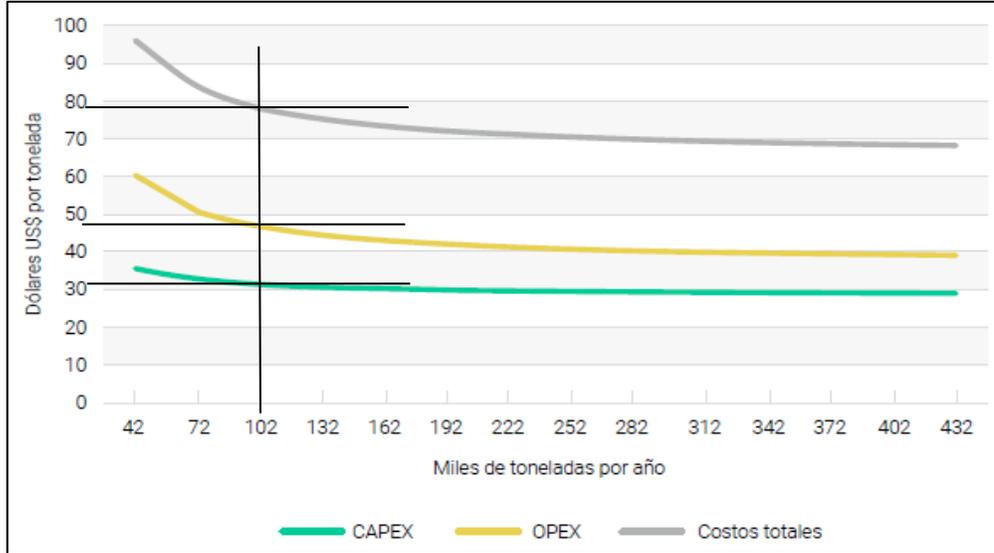
Cost estimates of an anaerobic digestion plant in developing countries – figures are a rough orientation only						
Initial Investment	Capital costs per ton & year of waste input	O&M costs per ton	Total cost per ton	Revenues* per ton	Cost** per ton waste input	Remark
12 – 20 million EUR	12 – 19 EUR/t	10 – 15 EUR/t	22 – 34 EUR/t	8 – 16 EUR/t	14 – 18 EUR/t	capacity 50,000 – 150,000 t/a, 20y operation, 6% p.a. IR

Nota. Fuente: *Waste-to-Energy Options in Municipal Solid Waste Management* (2017). Esta figura nos muestra los costos de inversión estimados para el montaje de una planta de D.A.

De la figura anterior se estima un valor para inversión inicial (CAPEX) del orden de los EUR16.000.000, tomando un promedio entre el valor mínimo y máximo debido a que se estima una planta de digestión anaerobia con capacidad para 100.000 Ton/año. Lo anterior considerando que la fracción orgánica de los residuos es de aproximadamente el 54,7%.

El costo por tonelada para operación y mantenimiento (OPEX) se estima en los EUR 12,5 asumiendo el mismo promedio entre valor mínimo y máximo. Ambos valores, CAPEX y OPEX, a precios del año 2017.

**Figura 6-2:** Costos de inversión y operación de plantas de tratamiento físico y biológico.



Nota. Fuente: *Sostenibilidad financiera de la gestión de residuos sólidos en América Latina y el Caribe* (2023). Esta figura nos muestra los costos de inversión y operación para plantas de tratamiento físico y biológico.

De la Figura 6-2 se obtiene un valor de inversión (CAPEX) definido por tonelada, estimado en USD 31/Ton que, asociado a la cantidad toneladas que podría procesar la tecnología arroja un valor total de inversión de USD 3.100.000. El costo de operación (OPEX), de la tecnología, por tonelada, se estima en USD 48, ambos valores a precios del año 2018.

Realizando un análisis comparativo de la información de ambos documentos se obtiene el siguiente cuadro comparativo:

**Tabla 6-7:** Comparativo de costos DA

Documento de referencia	Año de referencia	Inversión Inicial (CAPEX)	Costos de operación y mantenimiento (OPEX) (\$/ton)	Observaciones
	2017	EUR 16.000.000	EUR 28,00	Planta con capacidad para
	2021	EUR 17.047.004	EUR 29,83	

Documento de referencia	Año de referencia	Inversión Inicial (CAPEX)	Costos de operación y mantenimiento (OPEX) (\$/ton)	Observaciones
Guía Waste to Energy (2017)		USD 18.581.234	USD 32,52	100.000ton/año, 20 años de operación
BID (2023)	2018	USD 3.100.000	USD 48,00	
	2021	USD 3.302.857	USD 50,29	

Nota. Fuente: Elaboración propia. \* EUR 1 = USD 1,09. \*\* Inflación promedio entre 2017 y 2021 = 2%. Esta tabla muestra el comparativo de los costos de inversión y operación para plantas de tratamiento físico y biológico.

La información obtenida de las dos fuentes referenciadas presenta diferencias importantes para los valores estimados de inversión aunque en lo referente a la operación de la tecnología muestra una misma tendencia, se debe considerar que el documento del BID es amplio y no específico respecto a la tecnología de Digestión Anaeróbica, adicionalmente no plantea ingresos estimados; por estas razones, para el presente trabajo se consideran como datos de entrada los planteados en el documento *Waste-to-Energy Options in Municipal Solid Waste Management (2017)*.

Para aplicar la evaluación financiera planteada se utilizarán los siguientes supuestos y parámetros de entrada. La cantidad de residuos que se estima tratar el primer año se obtiene de los datos presentados en las tablas **Tabla 6-2** y **Tabla 6-3**.

**Tabla 6-8:** Cantidad de residuos estimados a tratar el primer año

Año	2020	2021	Promedio
<b>Residuos generados anualmente (Ton/año)</b>	167.148	171.657	169.402
<b>Porcentaje de residuos orgánicos sobre el total generado</b>	54,7%		
<b>Residuos orgánicos generados anualmente</b>	91.430	93.896	92.663

Nota. Fuente: elaboración propia. Esta tabla permite identificar estimaciones de residuos que pueden llegar a ser tratados en el primer año.

A continuación, se presentan los supuestos para la proyección financiera.

**Tabla 6-9:** Parámetros supuestos para proyección

Crecimiento anual de residuos	7%
Inflación anual	2%
TRM promedio año 2021	COP 3.743
Ingreso 1: ingreso por generación de energía estimado por tonelada recibida	COP 52.163
Ingreso 2: costo de disposición por tonelada en el relleno sanitario de Nuevo Mondoñedo (promedio año 2021)	COP 38.388
Costo operación y mantenimiento X Ton	COP 54.337
Costo de capital X Ton	COP 67.378

Nota. Fuente: elaboración propia. Esta tabla presenta supuestos para la proyección financiera. La TRM del año 2021 se tomó de las estadísticas que maneja el Banco de la República (Banco de la República, n.d.)

El costo de disposición final se refiere al valor que cuesta disponer una tonelada en el relleno sanitario de Nuevo Mondoñedo, en donde actualmente se disponen los residuos sólidos del municipio de Soacha, y fue tomado de la información del SUI (SSPD. Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2023). Este valor será sumado al valor que se estima recibir por la generación de energía resultado de la aplicación de la tecnología de DA, dado que la implementación de este proyecto supondrá la sustitución de la utilización del relleno sanitario para el adecuado manejo a los residuos sólidos.

Para el presente trabajo solo se contemplan los ingresos directos asociados al manejo, tratamiento y disposición de los residuos sólidos, es decir, no se contemplan ingresos adicionales por venta de subproductos o por subsidios estatales o gubernamentales derivados de la aplicación y desarrollo de la tecnología, debido a que el documento base de referencia no lo contempla dentro de sus supuestos.

Sin embargo, al realizar un análisis preliminar de los datos más relevantes para la realización de la proyección financiera, en la Tabla 6-7 Parámetros supuestos, se observa que los ingresos totales estimados por tonelada son del orden de COP 90.551 y los ingresos totales estimados por tonelada del orden de COP 121.715, es decir, de entrada

los costos están cerca de un 35% por encima de los ingresos, situación que significa categóricamente la inviabilidad financiera del proyecto en las condiciones planteadas.

### 6.2.2.2 Pirólisis/Gasificación

La estimación de costos de esta tecnología se realiza utilizando las mismas fuentes de información que el caso de la DA, como resultado se obtiene lo siguiente:

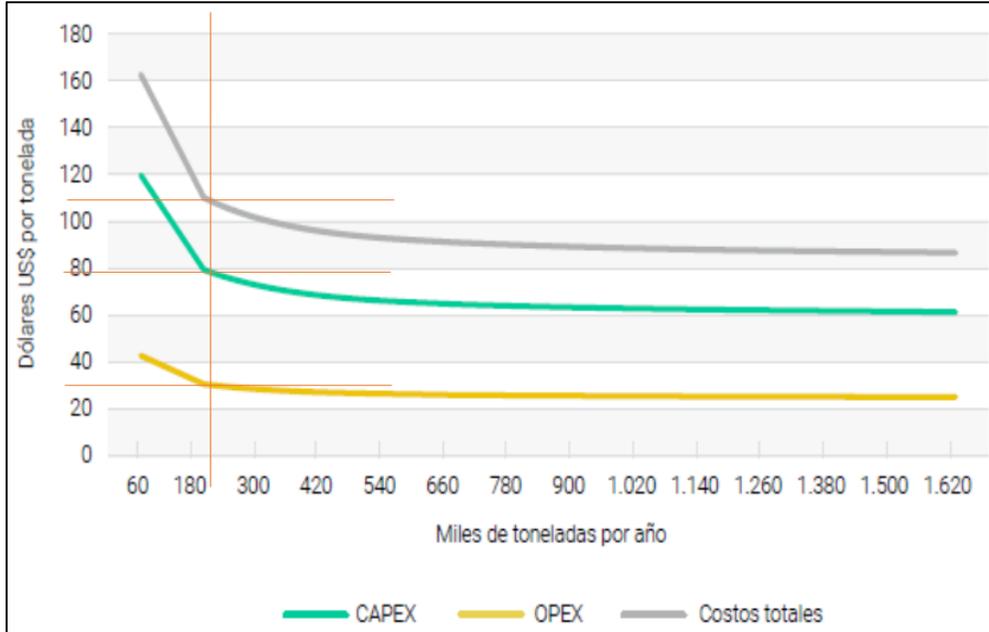
**Figura 6-3:** Costos asociados a la inversión en el proceso de digestión anaeróbica

Cost estimates of a pyrolysis/gasification plant in developing countries - figures are a rough orientation only						
Initial Investment	Capital costs per ton & year of waste input	O&M costs per ton	Total cost per ton	Revenues* per ton	Cost** per ton waste input	Remark
80 – 120 million EUR	35 – 45 EUR/t	30 – 40 EUR/t	65 – 85 EUR/t	2 – 5 EUR/t	63 – 80 EUR/t	Capacity 250,000 t/a, 20y operation, 6% p.a. IR

Nota. Fuente: *Waste-to-Energy Options in Municipal Solid Waste Management (2017)*. Esta figura nos muestra los costos de inversión estimados para la implementación de esta tecnología.

El cuadro anterior indica, a precios del año 2017, un valor promedio de CAPEX, para esta tecnología, de EUR 100.000.000, con costos estimados de EUR 35 por tonelada dispuesta, que para este caso correspondería al total de los residuos generados en el municipio, es decir, cerca de 170.000 ton/año.

**Figura 6-4:** Costos de inversión y operación de plantas de tratamiento físico y biológico.



Nota. Fuente: *Sostenibilidad financiera de la gestión de residuos sólidos en América Latina y el Caribe* (2023) Esta figura nos muestra los costos de inversión y operación para plantas de tratamiento físico y biológico.

De la figura anterior y siguiendo la misma dinámica de la evaluación financiera de la tecnología DA, se obtiene un valor estimado para el CAPEX, de USD 79 por tonelada dispuesta y de USD 30 por tonelada para el OPEX, ambos a precios del año 2018. El valor total del CAPEX, para una planta de aproximadamente 175.000 ton/año se estima en unos USD 13.825.000, a precios de 2018.

En resumen, se cuenta con la siguiente información:

**Tabla 6-10:** Comparativo de costos Pirólisis/Gasificación

Documento de referencia	Año de referencia	Inversión Inicial (CAPEX)	Costos de operación y mantenimiento (OPEX) (\$/ton)	Observaciones
Guía Waste to Energy (2017)	2017	EUR 100.000.000	EUR 65,00	Planta con capacidad para 175.000ton/año,
	2021	EUR 106.543.776	EUR 69,25	

Documento de referencia	Año de referencia	Inversión Inicial (CAPEX)	Costos de operación y mantenimiento (OPEX) (\$/ton)	Observaciones
		EUR 116.132.716	USD 75,49	20 años de operación
BID (2023)	2018	USD 13.825.000	USD 30,00	
	2021	USD 14.483.458	USD 31,43	

Nota. Fuente: elaboración propia. \* EUR 1 = USD 1,09. \*\* Inflación promedio entre 2017 y 2021 = 2%. Esta tabla nos muestra el comparativo de los costos de inversión y operación para plantas de tratamiento físico y biológico.

Al observar la Tabla 6-10, se encuentran, también para esta tecnología, diferencias importantes entre los estimados de las dos fuentes, dado que el planteamiento del documento *Waste-to-Energy Options in Municipal Solid Waste Management* es más completo y específico hacia la tecnología de pirolisis se toma su información para realizar esta evaluación financiera.

Para el caso de esta tecnología la cantidad de residuos a considerar corresponde al total generado en el municipio:

**Tabla 6-11:** Cantidad de residuos estimados a tratar el primer año

Año	2020	2021	Promedio
<b>Residuos generados anualmente (Ton/año)</b>	167.148	171.657	169.402

Nota. Fuente: elaboración propia. Esta tabla permite identificar estimaciones de residuos que pueden llegar a ser tratados en el primer año.

Los supuestos financieros y de ingresos planteados son los siguientes:

**Tabla 6-12:** Parámetros supuestos para proyección

Crecimiento anual de residuos	7%
Inflación anual	2%
TRM promedio año 2021	COP 3.743

Ingreso 1: ingreso por generación de energía estimado por tonelada recibida	COP 15.214
Ingreso 2: costo de disposición por tonelada en el relleno sanitario de Nuevo Mondoñedo (promedio año 2021)	COP 38.388
Costo operación y mantenimiento X Ton	COP 130.409
Costo de capital X Ton	COP 152.143

Nota. Fuente: elaboración propia. Esta tabla presenta supuestos para la proyección financiera.

De la Tabla **6-12** se puede concluir que la tecnología de pirolisis no presentará cierre económico dada la diferencia de más del 400% entre el valor de ingreso por tonelada (COP 53.602) y los costos totales por tonelada (COP 282.552), esto indica sin necesidad de correr un modelo financiero que el proyecto no es viable financieramente para las condiciones planteadas.

## 6.3 Evaluación de aspectos ambientales

La evaluación realizada al momento indica que ninguna de las tecnologías es viable para implementarse, en las condiciones supuestas y consideradas, en el sitio de evaluación. No obstante, este resultado, y con la finalidad de explicar la aplicación de la última etapa de la metodología planteada se realizará la evaluación de aspectos ambientales para la tecnología Digestión Anaeróbica.

Para estos efectos desarrollaremos los pasos planteados en el numeral 5.3 de este documento de la siguiente manera:

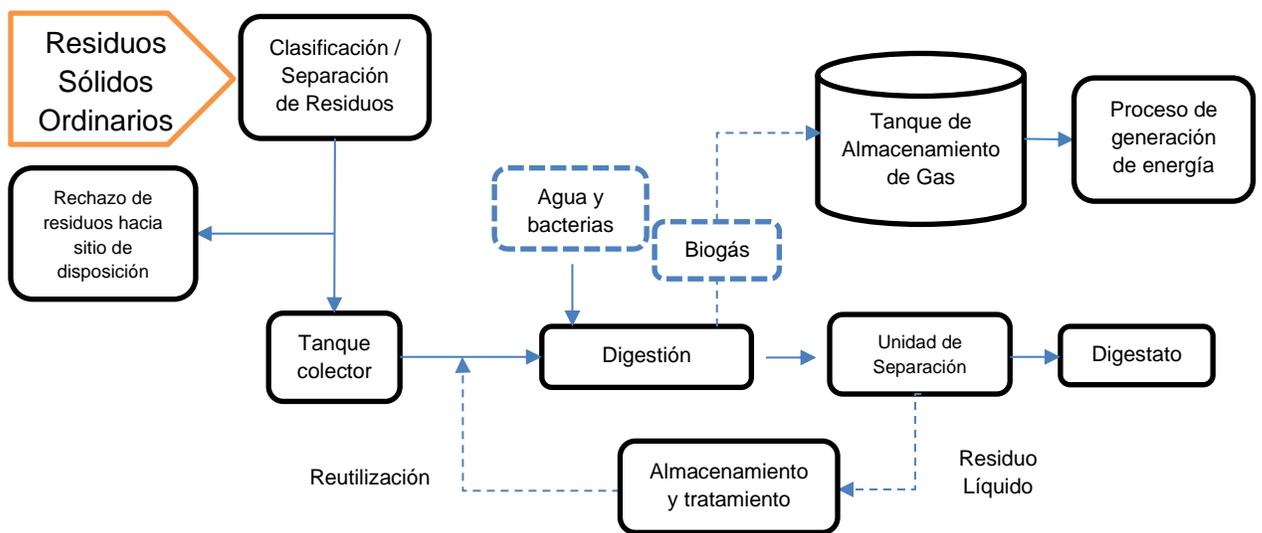
### 6.3.1 Objetivo

Realizar la evaluación de ciclo de vida al proceso de digestión anaeróbica de residuos sólidos ordinarios, en el municipio de Soacha – Cundinamarca, para evaluar la afectación que generaría al ambiente, determinando su viabilidad para ser implementada.

### 6.3.2 Inventarios de entradas y salidas del proceso de Digestión Anaeróbica

Los datos para realizar en inventario de entradas y salidas se obtuvieron del documento de la UPME(2018) , para lo cual se presenta un esquema de la tecnología.

**Figura 6-5:** Diagrama de análisis del ciclo de vida para el proceso de D.A. de residuos sólidos ordinarios



Nota. Fuente: elaboración propia. Esta figura muestra las entradas y salidas en el proceso de D.A., de los residuos sólidos.

El esquema anterior se resume en el siguiente inventario, que será utilizado para realizar la ponderación ambiental utilizando la Evaluación de Ciclo de Vida.

**Tabla 6-13:** Inventario de entradas y salidas

<b>ENTRADAS</b>	Residuos ordinarios	
	Agua	
	Bacterias	
<b>SALIDAS</b>	Efluentes Líquidos	Vertimientos

	Efluentes Sólidos	Digestato
		Rechazo de residuos
	Efluentes Gaseosos	Gases

Nota. Esta tabla relaciona el inventario de elementos que entran y salen del sistema para el proceso de la D.A. de los residuos.

### 6.3.3 Evaluación de Impacto Ambiental

Con base en los objetivos planteados y el inventario de entradas y salidas realizado para el proceso de Digestión Anaeróbica, se procede a realizar la evaluación de los impactos que se generan dentro de todo el ciclo de vida del proceso encontrando que, comparado con la alternativa de disposición de residuos tradicional, a través del uso de Relleno Sanitario, la DA genera impactos positivos asociados a:

1. El aprovechamiento de los gases que se generan en el proceso con la incorporación de los residuos para la generación de energía.
2. El residuo sólido o “digestato” resultado al final del proceso al estar reducido y con componente bacteriano puede ser utilizado como abono para compostaje.
3. En cuanto a los residuos líquidos generados estos se pueden reutilizar reincorporándolos al proceso como se observa en el diagrama anterior.

Existe un impacto que no es de carácter ambiental y es el referente al medio social, que no se analiza dentro del paso anterior y está asociado con el rechazo que genera en la comunidad la instalación de Rellenos Sanitarios por la alteración del paisaje y los olores ofensivos, entre otros, sobre este particular la DA también es un proceso más amigable para la población y los territorios en términos de cercanía con su lugar de ubicación.

Finalmente, a pesar de requerir para este proceso el recurso agua como insumo para la dilución de las bacterias, este no representa grandes cantidades y más cuando dentro del proceso se puede reutilizar el residuo líquido como se mencionó anteriormente.

### 6.3.4 Resultados

Dentro del análisis de los resultados se debe tener en cuenta que para que el proceso de DA se realice de manera apropiada se debe realizar previamente una separación de los residuos lo cual conlleva a tener que contar con una zona acondicionada para esta actividad, lo cual podría significar actividades y logísticas que dificultan la operación previa para llevar a feliz término el proyecto.

Los resultados se concentran en que el gas generado en el proceso de DA es altamente versátil produciendo energía renovable aprovechada a partir de residuos.

El digestato resultante del proceso es un compuesto rico en nutrientes para su reutilización en actividades de compostaje.

La DA es una opción más amigable con el ambiente que disminuye impactos y cumple con normas incluso a nivel internacional

En conclusión, comparado con un relleno sanitario la DA permite, el aprovechamiento de los residuos y al mismo al tiempo se genera energía renovable, se obtienen subproductos (digestato) reutilizables y finalmente se disminuye la contaminación ambiental.

**Tabla 6-14:** Análisis de impactos y resultados

Datos del Inventario		Impacto Ambiental	Conclusiones y Recomendaciones de la Evaluación
ENTRADAS	Residuos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alteración de la calidad del agua</li> <li>- Alteración de los ecosistemas acuáticos</li> <li>- Alteración de la calidad del suelo</li> <li>- Alteración de la cobertura vegetal</li> </ul>	La generación de residuos afecta la calidad de vida de las poblaciones y los ecosistemas, su disposición inadecuada produce altas concentraciones de metales, presencia de vectores, olores ofensivos entre otros que general impactos ambientales altos; sin embargo, en el proceso de DA esta dado para que se produzca una descomposición de los residuos en un proceso cerrado que minimice estos impactos y genere impactos positivos como gases para generación de energías alternativas, digestato para realizar compostaje, entre otros aquí analizados.
	Agua	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Agotamiento de recurso</li> </ul>	El uso del agua en mayores proporciones afecta la oferta y/o disponibilidad de esta, pero en el

			proceso de DA se tiene contemplado su uso en bajas cantidades lo cual se favorece con la reutilización del efluente líquido sobrante una vez realizada la digestión.
	Bacterias	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alteración de la calidad del agua</li> <li>- Alteración de la calidad del suelo</li> </ul>	Las bacterias utilizadas en el proceso de DA son altamente beneficiosas para mejorar algunas condiciones, ya que producen la descomposición de la materia orgánica presente en el agua o el suelo, razón por la cual su uso no representa que este impacto sea significativo.
<b>SALIDAS</b>	Efluentes Líquidos (Vertimientos)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alteración de la calidad del recurso hídrico superficial y subterráneo</li> <li>- Alteración de la calidad del suelo</li> </ul>	El vertimiento de lixiviados sin ningún proceso de tratamiento general graves alteraciones en la calidad del recurso hídrico y el suelo, pero para el caso de la DA aquí analizado este residuo líquido es reincorporado al proceso por lo cual no se materializa la generación de este impacto.
	Efluentes Sólidos (Digestato)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alteración de la calidad del suelo</li> </ul>	El residuo de digestato proveniente de la descomposición de residuos se convierte en aprovechable en procesos de compostaje por lo cual es baja la probabilidad de materializarse una alteración del suelo ya que en este caso realmente aporta nutrientes.
	Efluentes Gaseosos (Gases)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alteración de la calidad del aire</li> <li>- Alteración de las propiedades físicas del aire</li> </ul>	Este impacto se manifestaría potencialmente si no se realizara el aprovechamiento de los gases generados en el proceso de DA; por lo cual se convierte en un impacto positivo y por ende en una fuente de energía renovable.

Nota. Fuente: elaboración propia. Esta tabla analiza los elementos del inventario relacionados en las entradas y salidas del proceso, su impacto ambiental y las conclusiones y/o recomendaciones de la evaluación.

## 6.4 Evaluación de tecnologías

La evaluación de tecnologías WtE para desarrollar en el municipio de Soacha concluye que, para las condiciones financieras supuestas, ninguna de las tecnologías planteadas es viable de sostener con tan solo los recursos provenientes de la generación de energía y

del valor o costo de disposición final de residuos, es decir, necesariamente se tendrá que contar con recursos adicionales como subsidios estatales, compensaciones monetarias asociadas a la reducción de GEI e impactos ambientales en general y la venta de subproductos.

Descontando este aspecto la tecnología de DA resulta ser la más adecuada, respecto al resto de tecnologías planteadas, para su implementación en el municipio de Soacha.

## 7. Conclusiones y recomendaciones

### 7.1 Conclusiones

Cuando se inició la elaboración de este trabajo, hace alrededor de tres años, se planteaba como uno de los ejes centrales para justificar la realización de este trabajo, la necesidad de contar con herramientas, no existentes en ese momento, para evaluar proyectos para la generación de energía con métodos no convencionales en el entendido que la tendencia mundial iba en ese sentido más allá de lo que estaba sucediendo en Colombia pero desde hace poco más de un año, fuertemente influenciado por la situación sanitaria mundial que nos impactó durante gran parte de esos tres años, se han generado una serie de cambios drásticos en la dinámica de desarrollo y comportamiento mundial que, en lo que se refiere a Colombia, han propiciado el establecimiento de políticas que otorgan una muy importante relevancia a la implementación y desarrollo de la generación de energías alternativas, entre ellas la generación a través de residuos sólidos. La pregunta a si este trabajo era relevante ha sido resuelta con satisfacción y se ha conseguido el objetivo de plantear una secuencia lógica o metodología para la evaluación de proyectos WtE.

Los parámetros de evaluación, reflejados en los aspectos que se determinaron, por el consenso de profesionales con amplia experiencia y conocimiento en la materia, para evaluar las tecnologías WtE, demostraron ser los adecuados para una evaluación general de las tecnologías propuestas, no obstante, se observó que se debe considerar también el aspecto jurídico o legal, que inicialmente se contemplaban inmerso dentro del aspecto ambiental. Las consideraciones legales son fundamentales para viabilizar la implementación o no de proyectos de este tipo.

El presente trabajo supone una herramienta metodológica para apoyar el proceso de seleccionar o descartar dentro de una serie de alternativas la más adecuada desde puntos de vista técnicos, económicos, financieros y ambientales; aspectos de igual o mayor importancia como el social deberán ser incluidos en una etapa posterior del proyecto cuando se avance con el proceso de licenciamiento ambiental que supondrá la voluntad de implementación real del proyecto por parte de alguno de los actores dentro de la GRSM.

Se pudo estructurar un desarrollo sistemático, metodología, que de manera organizada permitió evaluar diferentes tecnologías para una localidad específica dado que contempló dentro del procedimiento de la metodología, una evaluación dirigida a las particularidades de cada localidad objetivo, para nuestro caso el municipio de Soacha. Sin embargo, también se evidenció que para una evaluación apropiada se debe contar con información ajustada, verídica y actualizada, de lo contrario el evaluador no tendrá manera de emitir un juicio acertado sobre las tecnologías. Sobre este mismo particular es fundamental que el evaluador o equipo evaluador cuente con el conocimiento suficiente sobre la temática que se está evaluando, esto garantizará una evaluación que entregue resultados consistentes y adecuados para la toma de decisiones empresariales que representaran inversiones de alta envergadura. La metodología como herramienta no es nada sin un buen evaluador que la aplique.

Se aplicó la metodología para el municipio de Soacha de manera exitosa, desde el punto de vista que pudo desarrollarse el estudio de caso para ilustrar la utilización de la metodología propuesta. Sin embargo, la información con que se contó para realizar la evaluación, especialmente la financiera, fue muy general y no reflejaba la realidad de la inversión y costos para la zona de estudio. Dado que este es un ejercicio académico la información utilizada fue la que se pudo obtener de documentos especializados, pero con estudios, análisis y estimaciones para regiones amplias, por esta razón debieron realizarse muchos supuestos que no representaban la realidad específica del sitio de estudio y de las tecnologías propuestas. Esta situación reafirma la necesidad de un muy buen conocimiento de las condiciones del sitio y de las tecnologías a evaluar.

Finalmente, del presente trabajo podemos concluir que la generación de energía a través de residuos sólidos es una alternativa real y necesaria para contribuir, con menores impactos ambientales, en la adecuada gestión de los RSM y como fuente de energías

alternativas, sin embargo, el WtE no es una solución mágica e instantánea; en Colombia los dirigentes, legisladores, ambientalistas, empresarios y comunidad en general no puede pretender que este tipo de tecnologías se implementen de manera radical e irresponsable, sin contar con la tecnología que actualmente se utiliza en el país para la gestión de RSM en su componente de disposición final, los rellenos sanitarios. Debe haber una transición y este tipo de tecnologías nuevas se debe entender como un complemento y mejora a lo existente, por supuesto tener claro que tanto la sociedad como el Estado (en una mayor medida) tendrán que realizar un mayor aporte para su realización, tanto de recursos económicos como de un mejor comportamiento en la fuente, realizando separación, reciclaje y reutilización.

## **7.2 . Recomendaciones**

La literatura y reportes de entidades con conocimiento en la temática, que se encontraron sobre la implementación de tecnologías WtE como herramientas para complementar o realizar la gestión de los RSM indican muchos casos fallidos con recursos significativos desperdiciados, en regiones en vía de desarrollo, como lo es nuestro país; es por esto se recomienda buscar estandarizar una metodología que sea de aplicabilidad oficial como ayuda a las de cabezas de gobiernos (nacionales o regionales) y/o de empresas dedicadas a esta actividad.

## Bibliografía

- Abad, V., Avila, R., Vicent, T., and Font, X. (2019). Promoting circular economy in the surroundings of an organic fraction of municipal solid waste anaerobic digestion treatment plant: Biogas production impact and economic factors. *Bioresource Technology*, 283(March), 10–17. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.03.064>
- PGIRS Decreto N° 421 de 2016, Pub. L. No. 421, 3 (2016).
- Alcaldía Municipal de Soacha. (2020). *Alcaldía Municipal de Soacha*. <http://alcaldiasoacha.gov.co/municipio/nuestro-municipio.html>
- Aleixandre-Tudó, J. L., Castelló-Cogollos, L., Aleixandre, J. L., and Aleixandre-Benavent, R. (2019). Renewable energies: Worldwide trends in research, funding and international collaboration. *Renewable Energy*, 139, 268–278. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.079>
- Aleluia, J., and Ferrão, P. (2017). Assessing the costs of municipal solid waste treatment technologies in developing Asian countries. *Waste Management*, 69, 592–608. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.047>
- Alzate-Arias, S., Jaramillo-Duque, Á., Villada, F., and Restrepo-Cuestas, B. (2018). Assessment of government incentives for energy from waste in Colombia. *Sustainability (Switzerland)*, 10(4), 1–16. <https://doi.org/10.3390/su10041294>
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales. (2018). *Metodología general para la elaboración y presentación de estudios ambientales*.
- Banco de la República. (n.d.). *Tasa representativa del mercado*. Retrieved July 29, 2023, from <https://www.banrep.gov.co/es/estadisticas/trm>
- Banco Mundial. (2023). *Inflación, precios al consumidor (% anual) - European Union*. <https://datos.bancomundial.org/indicador/fp.cpi.totl.zg?locations=EU>
- Bromley, D. W. (2008). Volitional pragmatism. *Ecological Economics*, 68(1–2), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.08.012>
- Calderón-Larrañaga, Y., García-Ubaque, C. A., and Pineda-Jaimes, J. A. (2021). A data mining approach to the relationships between landslides and open-pit mining activity:

A case study in soacha (cundinamarca). *DYNA (Colombia)*, 88(217), 111–119.  
<https://doi.org/10.15446/dyna.v88n217.89558>

Ley 1715, 2 Diario Oficial 25 (2014).

Correal, M. C., Faleiro, C., Piamonte, C., Rihm, J. A., and Zambrano, M. (2023). *Sostenibilidad financiera de la gestión de residuos sólidos en América Latina y el Caribe*. <http://dx.doi.org/10.18235/0004681>

CRA, C. de R. de A. P. y S. B. (2019). *Diagnóstico e Identificación de Problemas, Objetivos y Alternativas: Documento de Avance De Análisis de Impacto Normativo*. <https://www.cra.gov.co/documents/Documento-AIN-Inversiones-A-APROBADO-CE-3-04-2019-final-comprimido.pdf>

Cucchiella, F., D'Adamo, I., and Gastaldi, M. (2017a). Sustainable waste management: Waste to energy plant as an alternative to landfill. *Energy Conversion and Management*, 131, 18–31. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.012>

Cucchiella, F., D'Adamo, I., and Gastaldi, M. (2017b). Sustainable waste management: Waste to energy plant as an alternative to landfill. *Energy Conversion and Management*, 131, 18–31. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.012>

DANE. (2018). *Proyecciones de Población*. Serie de Proyecciones de Población Con Desagregación Nacional, Departamental, Municipal, y Cabecera – Resto (Centros Poblados y Rural Disperso). <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion>

Demichelis, F., Laghezza, M., Chiappero, M., and Fiore, S. (2020). Technical, economic and environmental assesment of bioethanol biorefinery from waste biomass. *Journal of Cleaner Production*, 277. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124111>

DNP. (2016). *El Consejo Nacional de Política Económica y Social, CONPES*. <https://www2.dnp.gov.co/CONPES/Paginas/conpes.aspx>

Duque-Oliva, E. J. (2002). *Planteamiento, Desarrollo y Divulgación de Resultados en Proyectos de Investigación: un Enfoque Aplicado a las Ciencias de Gestión*.

Eras, J. J. C., Morejón, M. B., Gutiérrez, A. S., García, A. P., Ulloa, M. C., Martínez, F. J. R., and Rueda-Bayona, J. G. (2019). A look to the electricity generation from non-conventional renewable energy sources in Colombia. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 9(1), 15–25. <https://doi.org/10.32479/ijeep.7108>

European Commission. (2015). Guide to Cost-benefit Analysis of Investment Projects: Economic appraisal tool for Cohesion Policy 2014-2020. In *Publications Office of the European Union*. <https://doi.org/10.2776/97516>

- Fetanat, A., Mofid, H., Mehrannia, M., and Shafipour, G. (2019). Informing energy justice based decision-making framework for waste-to-energy technologies selection in sustainable waste management: A case of Iran. *Journal of Cleaner Production*, 228, 1377–1390. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.215>
- Finnveden, G., Johansson, J., Lind, P., and Moberg, A. (2005). Life cycle assessment of energy from solid waste — part 1 : general methodology and results. *Journal of Cleaner Production*, 13, 213–229. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.02.023>
- García Serna, O. L. (2009). *Administración Financiera - Fundamentos y Aplicaciones* (Prensa Moderna Impresores, Ed.; 4th ed.).
- Hasnine, T., Anand, N., Zoungrana, A., Palani, S. G., and Yuan, Q. (2022). An Overview of Physicochemical and Biological Treatment of Landfill Leachate. In P. Pathak & S. G. Palani (Eds.), *Circular Economy in Municipal Solid Waste Landfilling: Biomining & Leachate Treatment* (pp. 115–152). Springer.
- Heidari, R., Yazdanparast, R., and Jabbarzadeh, A. (2019). Sustainable design of a municipal solid waste management system considering waste separators: A real-world application. *Sustainable Cities and Society*, 47(August 2018), 101457. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101457>
- ISO. (2006). *Environmental management-Life cycle assessment-Principles and framework*.
- ISO. (2015). *Norma ISO 14001* (Issue 3). <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14001:ed-3:v1:es>.
- Istrate, I. R., Iribarren, D., Gálvez-Martos, J. L., and Dufour, J. (2020). Review of life-cycle environmental consequences of waste-to-energy solutions on the municipal solid waste management system. *Resources, Conservation and Recycling*, 157(February), 104778. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104778>
- Kumar, A., and Samadder, S. R. (2017). A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste. *Waste Management*, 69, 407–422. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.046>
- Leme, M. M. V., Rocha, M. H., Lora, E. E. S., Venturini, O. J., Lopes, B. M., and Ferreira, C. H. (2014a). Techno-economic analysis and environmental impact assessment of energy recovery from Municipal Solid Waste (MSW) in Brazil. *Resources, Conservation and Recycling*, 87, 8–20. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.03.003>
- Leme, M. M. V., Rocha, M. H., Lora, E. E. S., Venturini, O. J., Lopes, B. M., and Ferreira, C. H. (2014b). Techno-economic analysis and environmental impact assessment of

energy recovery from Municipal Solid Waste (MSW) in Brazil. *Resources, Conservation and Recycling*, 87, 8–20.

<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.03.003>

Decreto 1076 de 2015, Pub. L. No. 1076, Diario Oficial 44 (2015).

Decreto 1077 de 2015, Pub. L. No. 1077, 672 (2015).

Mutz, D., Hengevoss, D., Hugi, C., and Gross, T. (2017). *Waste-to-energy options in municipal solid waste management*. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ).

[https://www.giz.de/en/downloads/GIZ\\_WasteToEnergy\\_Guidelines\\_2017.pdf](https://www.giz.de/en/downloads/GIZ_WasteToEnergy_Guidelines_2017.pdf)

ONU. (2015). *World Population Prospects 2015 - Data Booklet (ST/ESA/SER.A/377)*.

<https://doi.org/ST/ESA/SER.A/377>

Ospina, N. C., and Alvarez, M. C. G. (2018). Diagnóstico de las construcciones e infraestructura Sub urbanas en el Municipio de Soacha, consecuencia del crecimiento poblacional generado por el desplazamiento social. *Proceedings of the LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology, 2018-July(July)*, 19–21. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2018.1.1.472>

Özeler, D., Yetiş, Ü., and Demirer, G. N. (2006). Life cycle assesment of municipal solid waste management methods: Ankara case study. *Environment International*, 32(3), 405–411. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2005.10.002>

Sepúlveda, J. A. M. (2016). Outlook of Municipal Solid Waste in Bogota (Colombia). *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 9(3), 477–483.

<https://doi.org/10.3844/ajeassp.2016.477.483>

Sharma, K. D., and Jain, S. (2020a). Municipal solid waste generation, composition, and management: the global scenario. *Social Responsibility Journal*.

<https://doi.org/10.1108/SRJ-06-2019-0210>

Sharma, K. D., and Jain, S. (2020b). Municipal solid waste generation, composition, and management: the global scenario. *Social Responsibility Journal*, 16(6), 917–948.

<https://doi.org/10.1108/SRJ-06-2019-0210>

Silva dos Santos, I. F., Mambeli Barros, R., and Tiago Filho, G. L. (2018). Economic study on LFG energy projects in function of the number of generators. *Sustainable Cities and Society*, 41(April), 587–600. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.04.029>

SSPD, S. de S. P. D. (2018). *Informe de Disposición Final de Residuos Sólidos – 2017*.

[https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Publicaciones/Publicaciones/2018/Dic/2.\\_disposicion\\_final\\_de\\_residuos\\_solidos\\_-\\_informe\\_2017.pdf](https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Publicaciones/Publicaciones/2018/Dic/2._disposicion_final_de_residuos_solidos_-_informe_2017.pdf)

- SSPD, S. de S. P. D. (2021). Informe Nacional De Disposición Final De Residuos Sólidos 2020. In *Informe Nacional De Disposición Final De Residuos Sólidos*.  
[https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Publicaciones/Publicaciones/2022/Ene/informe\\_df\\_2020.pdf](https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Publicaciones/Publicaciones/2022/Ene/informe_df_2020.pdf)
- SSPD. Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2023). *Informe Nacional de Disposición Final de Residuos Sólidos 2021*.
- SUI, S. U. de I.-. (n.d.). *No Title*.  
[http://reportes.sui.gov.co/fabricaReportes/frameSet.jsp?idreporte=ase\\_com\\_125](http://reportes.sui.gov.co/fabricaReportes/frameSet.jsp?idreporte=ase_com_125)
- Superintendencia de Servicios Públicos. (2015). *Régimen Básico*. Imprenta Nacional de Colombia.
- Tangri, N., and Wilson, M. (2017). Gasificación y pirólisis de residuos: procedimientos de alto riesgo y baja rentabilidad para el tratamiento de residuos. *Gaia*. <http://www.no-burn.org/wp-content/uploads/Gasificación-y-pirólisis-2017-ESP.pdf>
- UPME Unidad de Planeación Minero Energética, and INERCO Consultoría. (2018). *Valorización Energética De Residuos: Proyecto WTE Colombia*.  
[https://bdigital.upme.gov.co/bitstream/001/1339/5/Productos 1%2C2 y 3\\_V2.pdf](https://bdigital.upme.gov.co/bitstream/001/1339/5/Productos%201%2C2%20y%203_V2.pdf)
- World Energy Council. (2016). World Energy Resources Waste to Energy | 2016. In *World Energy Council*. [https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2017/03/WEResources\\_Waste\\_to\\_Energy\\_2016.pdf](https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2017/03/WEResources_Waste_to_Energy_2016.pdf)
- Yaman, C., Anil, I., and Alagha, O. (2020). Potential for greenhouse gas reduction and energy recovery from MSW through different waste management technologies. *Journal of Cleaner Production*, 264, 121432.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121432>
- Yap, H. Y., and Nixon, J. D. (2015). A multi-criteria analysis of options for energy recovery from municipal solid waste in India and the UK. *Waste Management*, 46, 265–277.  
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.08.002>