



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**EVALUACIÓN DE 4 ALTERNATIVAS DE VALORIZACIÓN
ENERGÉTICA RESPECTO A LA DISPOSICIÓN EN RELLENO
SANITARIO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS DEL ÁREA
METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ MEDIANTE UN
ANÁLISIS DE DECISIÓN MULTI-CRITERIO (MCDA) BASADO EN
PROCESOS DE ANÁLISIS JERÁRQUICOS (AHP)**

Gabriel Fernando Vélez Patiño

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental
Medellín, Colombia
2021



Evaluación de 4 alternativas de valorización energética respecto a la disposición en relleno sanitario de los residuos sólidos del Área Metropolitana del Valle de Aburrá mediante un Análisis de Decisión Multi-Criterio (MCDA) basado en Procesos de Análisis Jerárquicos (AHP)

Gabriel Fernando Vélez Patiño

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Gestión Ambiental (Virtual)

Director:

Francisco José Molina Pérez, Dr. Ingeniería Química y Ambiental

Grupo de Investigación:

GAIA- Grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental

Medellín, Colombia

2021



A Claudia Andrea (mi esposa) por ser el respaldo para afrontar este reto, la racionalidad para tomar decisiones y la motivación de disfrutar cada amanecer.

A Manuela, quien con su inteligencia y grandes habilidades participó en diversos momentos de esta investigación

A Diana María Agudelo, quien me orientó con claridad, conocimiento y oportunidad para desarrollar la metodología en la investigación que están leyendo.

A Francisco, mi director de investigación, por atender mi llamado y brindarme la orientación precisa para avanzar.

A mi empresa por brindarme tiempo y espacio para mi desarrollo personal.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. BRECHAS QUE EXISTEN Y VACÍO QUE SE QUIERE LLENAR	5
3. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	7
4. OBJETIVOS	8
4.1 Objetivo general	8
4.2 Objetivos específicos	8
5. MARCO TEÓRICO	9
5.1 Síntesis del contexto general	9
5.2 Estado actual del conocimiento del problema (mundial y nacional)	11
5.3 Marco normativo asociado al proceso de valorización energética de residuos	16
5.3.1 Política Nacional para la gestión integral de residuos sólidos, CONPES 3874	18
5.3.2 Decreto 1077 de 2015	19
5.3.3 Ley 1715 de 2014	21
5.3.4 Decreto 1784 de 2017 y Resolución 938 de 2019	22
5.3.5 Directivas de la Unión Europea	24
5.4 Alternativas de valorización energética de residuos	25
5.4.1 Combustión con aprovechamiento energético	29
5.4.2 Gasificación	38
5.4.3 Pirólisis	43
5.4.4 Biodigestión	46
5.4.5 Rellenos sanitarios	51
5.4.6 Comentarios generales sobre las alternativas de valorización energética de residuos	57
6. MARCO METODOLÓGICO	69
6.1 Metodología de análisis multicriterio para la gestión de residuos sólidos	70
6.1.1 Criterios	72
6.1.2 Subcriterios	74
6.1.3 Proceso de análisis jerárquico	75
6.2 Elaboración de Entrevista- Encuestas	79
7. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	83
7.1 Resultados de la valoración del autor	83
7.2 Resultados de las encuestas diligenciadas	87
7.3 Resultado de la investigación	94
7.4 Análisis de resultados	95
8. CONCLUSIONES	99
9. REFERENCIAS	101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de la composición física porcentual de los diferentes estudios de caracterización de residuos sólidos en el sector residencial de Medellín para los años 2009, 2001, 2014 y 2018	3
Tabla 2. Costo típico de gestión de residuos por tipo de disposición (US\$/ton)	10
Tabla 3. Estándares de emisión admisibles de contaminantes al aire para instalaciones de incineración de residuos no peligrosos a condiciones de referencia (25 °C, 760 mm Hg) con oxígeno de referencia del 11%	33
Tabla 4. Plantas WTE en algunas regiones y países	35
Tabla 5. Sistema de clasificación de los CSR según EN 15359:2012	38
Tabla 6. Tratamiento biológico de los residuos	47
Tabla 7. Residuos dispuestos en el relleno sanitario La Pradera	54
Tabla 8. Descripción de tecnologías valorización energética de residuos (WtE)	59
Tabla 9. Requerimientos para la selección de plantas de WtE en el mundo	62
Tabla 10. Número y escala de instalaciones de tecnologías de valorización de residuos en todo el mundo ...	64
Tabla 11. Análisis del uso de distintos tipos de residuos en las tecnologías WtE	65
Tabla 12. Requerimientos de combustible RSD para las distintas tecnologías WtE	66
Tabla 13. Justificación de los subcriterios	74
Tabla 14. Índice aleatorio (IA)	78
Tabla 15. Escala de Saaty: Importancia relativa de cada criterio	83
Tabla 16. Ejemplo de calificación de una matriz pareada	84
Tabla 17. Matriz normalizada x vector promedio = vector de prioridad técnico	85
Tabla 18. Valor calculado de RC	85
Tabla 19. Vector de prioridad por alternativa y por criterio	86
Tabla 20. Vector de prioridad total	86
Tabla 21. Listado de encuestas enviadas y diligenciadas	87
Tabla 22. Vista del archivo de resultados de la entrevista – encuesta	92
Tabla 23. Resultados de las encuestas sin aplicar el AHP	93
Tabla 24. Vista del archivo de resultados de la entrevista – encuesta afectado por el método AHP	95
Tabla 25. Proceso de calificación y resultados	96

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Economía lineal vs economía circular.....	5
Figura 2. Jerarquía de la gestión de residuos sólidos.....	12
Figura 3. Ciclo de los residuos a energía (CEWEP, 2015).....	13
Figura 4. Número de plantas de WtE por región del mundo.....	14
Figura 5. Tecnologías de valorización de residuos.....	15
Figura 6. Procesos de las tecnologías de valorización energética de residuos.....	27
Figura 7. Países del mundo que tienen el mayor número de plantas de WtE.....	28
Figura 8. Diagrama de una planta de residuos a energía.....	31
Figura 9. Residuos a energía en Europa en 2017.....	34
Figura 10. Componentes de una planta de Pirólisis para tratamiento de residuos sólidos.....	45
Figura 11. Camino de la digestión anaeróbica.....	50
Figura 12. Esquema de generación de fertilizantes y energía con residuos orgánicos en DA.....	50
Figura 13. Disposición final en relleno sanitario.....	53
Figura 14. Resumen de la relación entre varias clases de rutas de conversión térmica.....	61
Figura 15. Alternativas de valorización de residuos vs disposición final.....	63
Figura 16. Fases o estado de regiones en el mundo de acuerdo con la gestión de residuos.....	68
Figura 17. Proceso de modelación de un modelo de multicriterio.....	71
Figura 18. Niveles del modelo AHP.....	72
Figura 19. Alternativas tecnológicas, criterios y subcriterios.....	73
Figura 20. Proceso de análisis jerárquico.....	76
Figura 21. Proceso de análisis entre alternativas, criterios y subcriterios.....	76
Figura 22. Entrevista tipo encuesta enviada a los profesionales de residuos.....	82
Figura 23. Resumen del proceso de priorización. Fuente:.....	87
Figura 24. Encuesta diligenciada.....	88

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Residuos dispuestos en el relleno sanitario la Pradera.....	54
Gráfico 2. Curva de Grubb sobre las etapas de desarrollo y madurez comercial de las tecnologías de WtE. .	67
Gráfico 3. Resultados de las encuestas – entrevistas sin aplicar el AHP	93
Gráfico 4. Resultado de la investigación.....	95
Gráfico 5. Proceso de calificación y resultados	96
Gráfico 6. Alternativa seleccionada	97

ÍNDICE DE FOTOS

Foto 1. Vista general y del horno de la planta de West Palm Beach Miami.....	36
Foto 2. Aspecto del Vaso Altair en el relleno sanitario la Pradera.....	53
Foto 3. Componentes de tratamiento de un relleno sanitario	56

RESUMEN

El relleno sanitario La Pradera ubicado en el Municipio de Donmatías (Antioquia) recibió en promedio 3.200 ton/día de residuos sólidos de Medellín y otros 30 municipios de Antioquia en el 2019 (Emvarias, 2019). Este relleno tiene una vida útil estimada de 20 años, por lo que es fundamental encontrar alternativas que permitan disminuir la generación de residuos y suplir las necesidades de disposición final, mediante campañas educativas, incremento de la separación en la fuente, recolección selectiva, aprovechamiento y tratamiento, y la implementación de procesos de valorización energética de los residuos. En Colombia, la normatividad sobre gestión de residuos (Decreto 1077 de 2015) y la regulación tarifaria de aseo (Resolución 720 de 2015) establecen la técnica de relleno sanitario como alternativa para la disposición final de residuos. Sin embargo, la valorización energética es una opción relevante para su gestión, ya que demanda menos espacio para su desarrollo, permite disminuir la cantidad de residuos a disponer, incrementa el aprovechamiento y genera productos de alto valor como energía, syngas o biogás, demostrando mayores efectos positivos que negativos respecto a la disposición final en rellenos sanitarios. La Ley 1715 de 2014, promueve el desarrollo y utilización de fuentes no convencionales de energía (FNCE), entre ellas la biomasa o los residuos sólidos, y los Decretos 1784 de 2017 y 2412 de 2018, generan alternativas de financiación al aprovechamiento y el tratamiento de residuos sólidos. Para su adecuada implementación se requiere, además de voluntad, recursos para formación profesional, tecnológica y ciudadana, e inversión para que los rellenos sanitarios le den paso a la valorización energética de residuos, evitando así una crisis ambiental y de salud pública en el mediano plazo para más de 4,1 millones de personas (DANE, 2018). Seleccionar la mejor tecnología de valorización es también un reto, debido a la diversidad de tecnologías y su estado de desarrollo; por tal razón, este trabajo fundamentó la selección de una alternativa de valorización energética a través del uso de metodologías de análisis multicriterio basada en procesos de análisis jerárquico, donde se valoraron las alternativas de combustión con aprovechamiento energético, biodigestión, gasificación y pirólisis, con base en la experiencia y conocimiento del autor y de 26 expertos en el tema a través de encuestas y entrevista. Los resultados mostraron que la alternativa más adecuada para la valorización energética de los residuos sólidos generados en Medellín y la región metropolitana del Valle de Aburrá es la incineración, seguido por la biodigestión y en tercer lugar el relleno sanitario.

Palabras clave: residuos, valorización, incineración, biodigestión, pirólisis, gasificación.

ABSTRACT

The La Pradera landfill located in the Municipality of Donmatías (Antioquia) received an average 3,200 tons / day of solid waste from Medellín and 30 other municipalities of Antioquia in 2019 (Emvarias, 2019). This landfill has an estimated useful life of 20 years, so it is essential to find alternatives that allow reducing the generation of waste and meeting the needs for final disposal, through educational campaigns, increased separation at the source, selective collection, use and treatment, and the implementation of waste energy recovery processes. In Colombia, the regulations on waste management (Decree 1077 of 2015) and the cleaning fee regulation (Resolution 720 of 2015) establish the sanitary landfill technique as an alternative for the final disposal of waste. However, energy recovery is a relevant option for its management, since it requires less space for its development, allows reducing the amount of waste to be disposed of, increases the use and generates high-value products such as energy, syngas or biogas, demonstrating greater Positive rather than negative effects regarding final disposal in landfills. Law 1715 of 2014, promotes the development and use of non-conventional sources of energy (FNCE), including biomass or solid waste, and Decrees 1784 of 2017 and 2412 of 2018, generate financing alternatives to the use and treatment solid waste. For its proper implementation, in addition to the will, resources are required for professional, technological and citizen training, and investment so that sanitary landfills give way to the energy recovery of waste, thus avoiding an environmental and public health crisis in the medium term. for more than 4.1 million people (DANE, 2018). Selecting the best recovery technology is also a challenge, due to the diversity of technologies and their state of development; For this reason, this work based the selection of an alternative for energy recovery through the use of multi-criteria analysis methodologies based on hierarchical analysis processes, where the combustion alternatives with energy use, biodigestion, gasification and pyrolysis were evaluated, based on on the experience and knowledge of the author and 26 experts on the subject through surveys and interviews. The results showed that the most suitable alternative for the energy recovery of the solid waste generated in Medellín and the metropolitan region of Valle de Aburrá is incineration, followed by biodigestion and in third place the sanitary landfill.

Keywords: wastes, valorization, incineration, biodigestion, pyrolysis, gasification.

1. INTRODUCCIÓN

En Colombia, el Decreto 1077/2015 y la Resolución 720/2015 (regulación tarifaria de aseo) establecen el relleno sanitario como la tecnología de referencia, en costos, para disponer los residuos sólidos. Adicionalmente, el Decreto 1784 de 2017 incluye la actividad de tratamiento como acción complementaria a la disposición final. La Ley 1715 de 2014 promueve el desarrollo y la utilización de fuentes no convencionales de energía (FNCE) como los residuos sólidos; el Decreto 1784 de 2017 (Actividades complementarias a la disposición final), y el Decreto 2412 de 2018 (incentivo al aprovechamiento) permiten opciones financieras para la valorización energética de residuos sólidos, factores que podrán viabilizar este tipo de alternativas. De acuerdo con lo anterior, se requiere realizar evaluaciones que comprendan los ámbitos económicos, sociales y ambientales con el fin de recomendar a los tomadores de decisiones nuevas alternativas para la gestión final de los residuos sólidos, además de establecer condiciones que habiliten a las entidades territoriales, empresas de energía, entre otras, a realizar inversiones que permitan viabilizar los nuevos desarrollos.

La Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios reportó, en el año 2018, que se depositaron en 192 sitios (rellenos sanitarios, celdas de contingencia o plantas de tratamiento) 10.853.833,9 ton (Informe de Disposición Final de Residuos Sólidos – 2018). De esta cantidad, el mayor porcentaje se genera en Antioquia, Valle del Cauca, Bogotá y Atlántico. De acuerdo con el mismo informe, en Colombia, 116 municipios depositan sus residuos en botaderos a cielo abierto. De los 192 sitios aprobados, 117 (el 60%) tiene una vida útil menor a 10 años. Al relleno sanitario La Pradera se llevaron 1.140.212 ton de residuos sólidos generados por cerca de 40 municipios de Antioquia, incluidos Medellín, Bello, Envigado y municipios del Área Metropolitana (Emvarias, 2018). Entre 2010 y 2017 la disposición final creció en promedio 3,3%/año. De acuerdo con esta tendencia, este relleno sanitario, construyendo dos vasos adicionales a los actuales, tendría vida útil cercana a los 20 años (Emvarias, 2018), poco tiempo para una región con más de 4,1 millones de habitantes (DANE, 2018), que no tiene sitios, ni lotes definidos para la disposición final de sus residuos en el futuro (ACODAL- Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2018). Lo acá planteado evidencia el problema que tienen Medellín y el Valle de Aburrá y que se refleja también

en Colombia, con relación al incremento permanente en la generación de residuos sólidos y las dificultades para tener un espacio para disponerlos de forma adecuada en los próximos años.

La valorización energética de residuos sólidos, vía incineración, consiste en la oxidación total de los residuos en exceso de aire y a temperaturas superiores a 850°C (DIRECTIVA 2000/76/CE). Se realiza en hornos apropiados con aprovechamiento de la energía producida, de modo que como resultado del proceso de valorización energética se obtiene energía térmica, residuos sólidos y gases de combustión (Jimenez, Cruzate Romero, & Naranjo Ibañez, 2017). De acuerdo con la Comisión Europea (European Commission, 2016), las plantas de recuperación de energía están dominando la participación del aprovechamiento energético de residuos (Waste to Energy- WtE, por sus siglas en inglés). Dichas plantas se integran con las redes de calefacción urbana. La incineración tiene aproximadamente un 23% de eficiencia cuando solo produce electricidad, mientras que los procesos combinados de Calor y Energía (CHP) tienen hasta un 90% de eficiencia (European Commission, 2016).

Los proyectos de incineración requieren grandes inversiones (CAPEX 4 a 20 veces) y altos costos de operación (OPEX 2 a 5 veces), superiores a los de un relleno sanitario, de acuerdo con Decision Maker's Guides for Solid Waste Management Technologies (Kaza & Bhada-Tata, 2018), lo cual constituye un riesgo financiero sustancial para un municipio o una empresa prestadora del servicio público de aseo, toda vez que sus ingresos están definidos por impuestos o por tarifas.

La composición de los residuos sólidos generados en un municipio o en una zona determinada es información relevante al momento de plantear cualquier proyecto de gestión de residuos y en particular los de valorización energética, dado que esto permitirá determinar potencial de reciclaje o aprovechamiento, de acuerdo con la presencia de materiales reciclables u orgánicos, así como por el grado de humedad o el poder calorífico. La Tabla 1 presenta el resultado de una caracterización de residuos del Municipio de Medellín elaborada por el Consorcio Medellín para la Secretaría de Gestión y Control Territorial en 2018-2019.

Tabla 1

Comparación de la composición física porcentual de los diferentes estudios de caracterización de residuos sólidos en el sector residencial de Medellín para los años 2009, 2001, 2014 y 2018.

COMPONENTE	PORCENTAJE %			
	2009	2011	2014	2018
BIODEGRADABLE Y PUTRESCIBLES	53,80	60,01	55,39	40,20
ORDINARIOS E INERTES	25,30	17,96	18,45	28,55
PLÁSTICOS	6,70	8,23	8,61	11,74
PAPEL	3,20	3,38	3,74	2,70
CARTÓN	2,10	2,16	1,79	3,16
VIDRIO	2,10	2,77	3,65	4,09
TEXTILES	2,10	2,42	4,20	3,40
METALES	0,80	0,82	1,36	1,38
ESCOMBROS	1,90	0,94	0,38	0,66
TETRAPACK	0,30	0,41	0,15	0,82
ELECTRÓNICOS	0,50	0,24	0,19	0,50
PELIGROSOS	1,20	0,69	1,16	2,02

Fuente: Caracterización de residuos sólidos generados en el sector residencial del área urbana y rural del Municipio de Medellín y sus cinco corregimientos. (Secretaría de Gestión y Control Territorial, 2019) y este complementado con datos del informe sobre caracterización de la Universidad de Medellín (2014).

De acuerdo con lo presentado en la Tabla 1, más del 22% de los residuos que llegan al relleno sanitario son reciclables (papel, cartón, plástico, vidrio, metal), demostrando que la separación en la fuente es aún deficiente, que falta mayor relación con los recicladores, que aún es baja la implementación de rutas selectivas, y que existe un gran potencial para el aprovechamiento de los residuos urbanos. Adicionalmente, el alto porcentaje de los biodegradables (40%) plantea la necesidad de dar solución y tratamiento a este tipo de residuos. Es de anotar que el aprovechamiento de residuos reciclables durante el 2016 en el AMVA fue del 16% (ACODAL - Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2018). Para cambiar esta situación, se debería comenzar con campañas de educación en la no generación, programas de separación en la fuente, estimular la recolección selectiva, establecer plantas de clasificación y separación de residuos reciclables (comercializar), orgánicos (biodigestión o compostaje) y otros. La suma de estas alternativas permitirá disminuir una importante cantidad de residuos en el relleno sanitario.

Una condición importante para la valorización energética de los residuos sólidos es el poder calorífico. Este debe estar en un rango entre 6,5 y 10,5 MJ/kg, como se describe en Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Incineration (Joint Research Centre, 2018). De igual manera, la Confederación Europea de Plantas de Waste to Energy (CEWEP, por sus siglas en inglés) reporta que el valor promedio del poder calorífico de más de 300 plantas en Europa es de 10 MJ/kg (Reimann, 2012), y según Kamuk (2013), debe ser superior a 7 MJ/kg o 1673 kilocalorías/kg. Los residuos de Medellín, de acuerdo con la caracterización realizada por el Consorcio Residuos Sólidos Medellín (Secretaría de Gestión y Control Territorial, 2019), poseen un poder calorífico en base húmeda entre 1667,757 y 1841,812 kcal/kg (6,97 – 7,71 MJ/kg).

Aparte de los aspectos técnicos, las condiciones económicas, normativas, regulatorias y sociales acentúan la complejidad en la implantación de procesos de valorización de residuos en Colombia. Por tal razón, se deberán dar cambios en estos aspectos: por ejemplo, diversificar la matriz de energías renovables, favorecer la producción de energía con biomasa y residuos sólidos, ajustar los precios de compra de esta energía, e incorporar cambios en la regulación de aseo (Correal, 2014) y energía. De igual manera, considerar aspectos ambientales más exigentes en la tecnología de relleno sanitario, de tal forma que sus costos de inversión y operación sean más cercanos a los de una planta de valorización. Adicionalmente, se debe mencionar que el aspecto social es muy complejo por la alta participación de recicladores en las actividades de aprovechamiento. En Antioquia participan más de 10.000 recicladores de oficio (SSPD - DNP - Ap, 2016) como actores importantes en la cadena de reciclaje, por lo tanto, cualquier alternativa de valorización deberá tener en cuenta este grupo poblacional (recicladores).

De acuerdo con lo planteado hasta aquí, este trabajo realiza una comparación entre la disposición final en relleno sanitario y alternativas para la valorización energética de los residuos sólidos, como son *la combustión con aprovechamiento energético, la gasificación, la pirólisis y la biodigestión*, mediante el concepto del autor y el análisis de expertos, utilizando el Análisis de Decisión Multi-Criterio (MCDA, por sus siglas en inglés) y apoyado en el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés), de tal manera que esta información pueda ser utilizada como referencia para la toma de decisiones en la región.

2. BRECHAS QUE EXISTEN Y VACÍO QUE SE QUIERE LLENAR

En Colombia, el propósito general de las políticas y las estrategias nacionales de gestión de residuos está contenido en el objetivo general del documento CONPES 3874 de 2016 (Departamento Nacional de Planeación, 2016, p. 46): “Implementar la gestión integral de residuos sólidos como política nacional de interés social, económico, ambiental y sanitario, para contribuir al fomento de la economía circular, desarrollo sostenible, adaptación y mitigación al cambio climático”. Lo anterior establece una transición de una economía lineal a una economía circular, como se observa en la *Figura 1*.

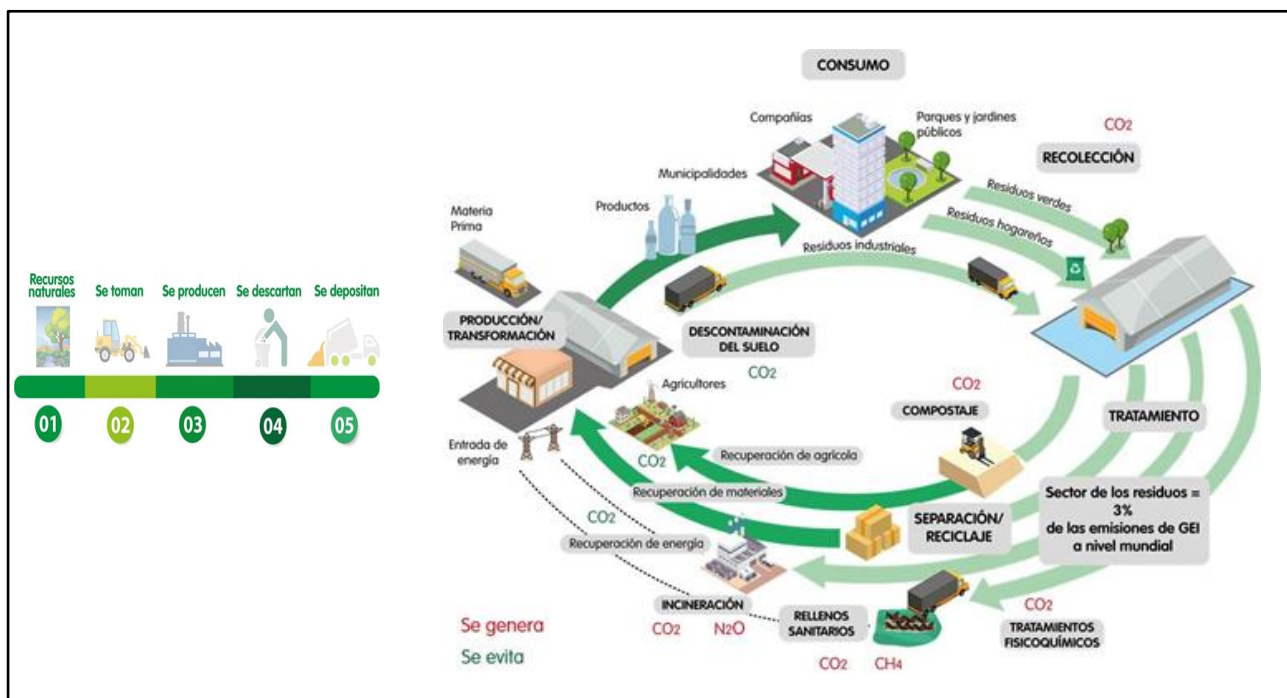


Figura 1. Economía lineal vs economía circular. Fuente: Elaboración de Emvarias - Grupo EPM a partir de Ellen MacArthur Foundation.

De acuerdo con la inversión en la cadena de gestión de residuos (United Nations Environment Programme, 2015), donde la prevención, el reúso y el reciclaje son la primera opción de la cadena, es necesario emprender acciones dirigidas hacia la articulación de las políticas públicas con el papel que desempeñan los principales actores relacionados con la disminución en la generación de los residuos sólidos, la reutilización y el reciclaje. Esto implica un mayor compromiso por parte de las entidades territoriales frente al diseño de sus Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos

- PGIRS, en los cuales se deben incluir proyectos educativos donde primen conceptos sobre cultura de la no basura, separación en la fuente, aprovechamiento de residuos orgánicos, y la entrega de materiales reciclables a organizaciones de recicladores. De igual manera, se deben fortalecer los diferentes actores de la actividad de aprovechamiento con programas de formalización de la población recicladora de oficio (Informe Nacional de Aprovechamiento, 2016) y la promoción de nuevas alternativas de tratamiento y aprovechamiento mediante el compostaje, la biodigestión y la valorización energética de los residuos sólidos.

Lo anterior busca, entre otros aspectos, disminuir la cantidad de residuos sólidos a disponer en los rellenos sanitarios, y la cantidad de materias primas vírgenes para nuevos productos. Para ello se requiere aumentar los niveles de recuperación y aprovechamiento, así como permitir nuevos desarrollos para valorizar los residuos sólidos.

3. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cuál de las alternativas de valorización energética de residuos, entre la combustión con aprovechamiento energético, gasificación, pirólisis y digestión anaerobia, tienen mayor potencial de aplicación en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá como opción de reemplazo o complemento a la alternativa actual de disposición final de los residuos sólidos en relleno sanitario?

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Evaluar las alternativas de valorización energética (combustión con aprovechamiento energético, gasificación, pirólisis y biodigestión) de los residuos sólidos generados en el Valle de Aburrá respecto a la disposición final en relleno sanitario mediante la metodología de Análisis de Decisión Multi-Criterio (MCDA) apoyado en el proceso de análisis jerárquico (AHP).

4.2 Objetivos específicos

- Analizar la visión de expertos en gestión de residuos y las alternativas de valorización energética de residuos.
- Examinar aspectos técnicos, financieros, sociales y ambientales de la disposición final de residuos sólidos en relleno sanitario versus la valorización energética.
- Comparar los resultados obtenidos en la encuesta y al aplicar la metodología de decisión multi-criterio.

5. MARCO TEÓRICO

5.1 Síntesis del contexto general

La gestión de los residuos sólidos es uno de los principales problemas que debe enfrentar la sociedad actual, dada su generación creciente y su gran impacto ambiental, social y económico (Grau & Farré, 2011). Hoy en el mundo se generan más de 1,4 billones de ton/año de residuos y se espera que para el 2050 esta cifra llegue a los 3,4 billones de ton/año, con incrementos hasta del 80% en el costo de su gestión (Kaza, Yao, Bhada-Tata, & Van Woerden, 2018).

Una población en crecimiento, una alta urbanización y un cambio hacia un estilo de vida de consumo están llevando a la generación de grandes volúmenes de desechos sólidos en el mundo, los cuales no se gestionan de la misma manera ni de forma adecuada en todas las ciudades (CIWM, 2018). Lo anterior denota la brecha existente entre los gobiernos de altos y bajos ingresos, por ejemplo, entre los países del hemisferio norte (Noruega, Dinamarca, Alemania Suecia, Finlandia entre otros) que demandan nuevas y mayores fuentes de energía a diferencia de los del trópico (como Colombia, Ecuador, Brasil, entre otros).

De acuerdo con Kaza, Yao et al. (2018), en la mayoría de los países las operaciones de manejo de desechos sólidos son típicamente una responsabilidad del ente territorial local, y casi el 70% de los países han establecido instituciones responsables del desarrollo de políticas y la supervisión regulatoria en el sector de desechos, creando leyes y regulaciones específicas para la gestión de dicho sector, aunque su cumplimiento varía drásticamente. En Colombia, la participación directa del gobierno central en la provisión de servicios de residuos corresponde a la elaboración de normas, la gestión, la supervisión regulatoria y las transferencias fiscales.

La financiación de los sistemas de gestión de residuos sólidos es un reto importante, aún más por los costos operativos que por las inversiones. en los países de América Latina y Caribe, donde prevalecen modelos financiados directamente por las municipalidades y en muchos casos no se recuperan los costos del servicio (Savino, Zolorzano, Quispe, & Correal, 2018). En países de altos ingresos, los costos operativos para la gestión integrada de residuos, incluida la recolección, transporte, tratamiento y eliminación, generalmente exceden los US\$ 200 por tonelada, mientras

que en los países de ingresos bajos se gasta menos de US\$ 70 por tonelada (Kaza, Yao et al., 2018) (ver Tabla 2). En Medellín se paga alrededor de US\$ 10/ton (Emvarias, 2020). Las diferencias en estos costos se corresponden con el tamaño del estado, el nivel de ingresos y el manejo exigido por cada estado, entre otras. La forma de cobrar este servicio también varía: puede ser a través de impuestos o por tarifas. En ambos casos se facturan a los usuarios (viviendas) por periodos diferentes, ya sea mensual, bimensual o anual, siendo esta una acción ejecutada por las empresas de aseo (ESP) o los organismos de impuestos municipales. Los ingresos que generen estas operaciones se suponen suficientes para soportar los costos de operación e inversión que se hacen para gestionar adecuadamente los residuos sólidos.

Tabla 2.

Costo típico de gestión de residuos por tipo de disposición (US\$/ton).

ÍTEM	PAÍSES DE INGRESOS BAJOS	PAÍSES DE INGRESOS BAJOS-MEDIOS	PAÍSES DE INGRESOS MEDIOS-ALTOS	PAÍSES DE INGRESOS ALTOS
Recolección y transferencia	20-50	30-75	50-100	90-200
Relleno sanitario controlado	10-20	15-40	20-65	40-100
Disposición a cielo abierto	2-8	3-10	-	-
Reciclaje	0-25	5-30	5-50	30-80
Compostaje	5-30	10-40	20-75	35-90

Fuente: World Bank Solid Waste Community of Practice and Climate and Clean Air Coalition (citado en Kaza, Yao et al., 2018, p.106). Traducido por el autor.

Otro aspecto por considerar es la cobertura de servicios de recolección y disposición final de residuos. En los países de ingresos bajos y medios es menor al 40%, mientras que en los países de ingresos altos alcanza el 98% (Mark, Brandon, & Ainhoa, 2013). Incluso algunos países de ingresos medios siguen deshaciéndose de sus residuos en botaderos a cielo abierto o rellenos escasamente controlados. Medellín cuenta con una cobertura del 99% en recolección y transporte, y del 98% en disposición final (Emvarias, 2018). El porcentaje faltante corresponde básicamente a zonas rurales y de difícil acceso, así como por la disposición inadecuada en quebradas o lotes baldíos de parte de habitantes irresponsables.

5.2 Estado actual del conocimiento del problema (mundial y nacional)

La disposición final de residuos es una solución intermedia o transitoria, pero aún necesaria para la eliminación de residuos; sin embargo, no debe ser el objetivo final de una gestión ambiental sostenible. Los sistemas de manejo de residuos sólidos urbanos deben priorizar el reciclaje de materiales y su aprovechamiento (ISWA, 2013).

De acuerdo con el Earth Engineer Center, en su *Guía para la recuperación de energía y materiales de residuos* (Themelis, Diaz Barriga, Estevez, & Gaviota Velasco, 2013) existen varios enfoques y tecnologías para mejorar las prácticas de gestión de residuos sólidos, que van desde la reducción de la generación de residuos mediante un mejor diseño de productos y envases (economía circular), el reciclaje de materiales utilizables, el compostaje de residuos verdes y orgánicos, así como la combustión con recuperación de energía. En el mundo, más del 80% del residuo urbano que no se separa total de los residuos sólidos generados, se deposita en rellenos sanitarios (alrededor de mil millones de toneladas por año), y sólo el 20% de estos residuos se aprovechan (Themelis, Diaz Barriga, Estevez, & Gaviota Velasco, 2013).

La Jerarquía de la Gestión de los Residuos de la Figura 2 (pirámide invertida) (Directive 2008/98/EC.) establece la disposición final como último elemento en la escala, y se propone en su orden: la reducción de la generación, el incremento del reúso, el aumento del reciclaje (aprovechamiento), el tratamiento de residuos orgánicos (compostaje– digestión anaerobia, etc.) y el tratamiento con recuperación de energía, antes de llegar a la disposición final. Esta jerarquía ha sido asumida en Colombia a través del documento CONPES 3874/2016, (Departamento Nacional de Planeación, 2016), en la página 25.

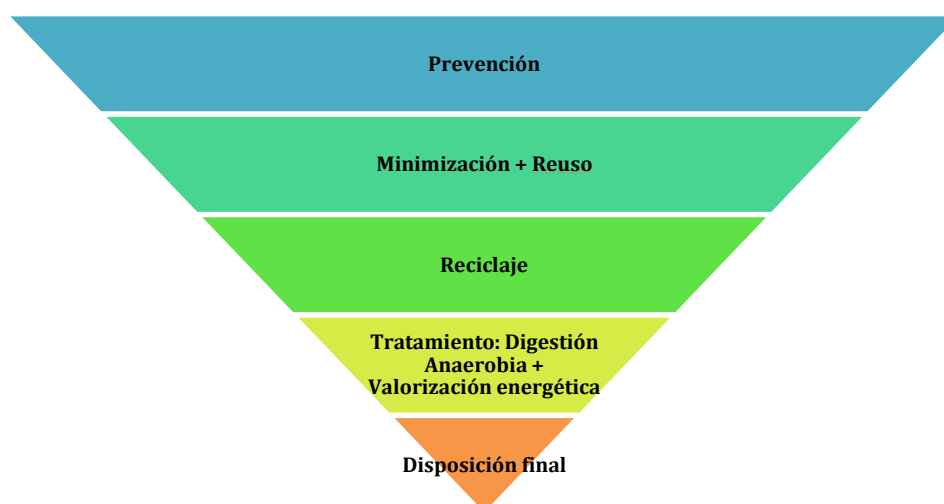


Figura 2. Jerarquía de la gestión de residuos sólidos Fuente: Directiva 2008/98 EC. Adaptada por el autor.

El desarrollo del CONPES 3874/2016 es fundamental, a pesar de que los avances son mínimos. Por eso, en regiones como el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, el trabajo en la disminución de la generación y la separación en la fuente deben ser las premisas de la gestión de residuos sólidos, de tal manera que se logre el máximo aprovechamiento y tratamiento de los residuos reciclables y orgánicos. Aun así, estas acciones no van a lograr desviar el 100% de los residuos, por lo que es importante entender y analizar las diferentes opciones de valorización energética de residuos, ya sea por la gran oportunidad que brindan al disminuir de manera considerable los residuos a disponer en los rellenos sanitarios, como al generar conocimientos previos que permitan tener un criterio suficiente frente a los oferentes de este tipo de tecnologías.

Las tecnologías de producción de energía con residuos (WtE) recuperan energía de los residuos, ya sea en forma de calor, electricidad, combustible alternativo o como biogás. Estas tecnologías pueden reducir significativamente el volumen de residuos en los rellenos sanitarios hasta un 90% (Directive 2008/98/EC.). De acuerdo con la empresa Babcock & Wilcox (2019), WtE es una parte vital de una cadena de gestión de desechos sólidos, complementario al reciclaje. Es una forma económica y ecológica de proporcionar una fuente de energía renovable, a la vez que desvía los desechos de los vertederos. La eficiencia de la conversión en energía depende de la composición de la materia prima y el tipo específico de tecnología WtE empleada, aunque siempre será menos eficiente, hasta un 65%, que una planta que genere energía a partir de combustibles fósiles

(Directive 2008/98/EC.). De acuerdo con la *Confederation of European Waste-to-Energy Plants-CEWEP* (2015), cada año se evitan hasta 50 millones de toneladas de emisiones de CO₂ equivalente en Europa, toda vez que la valorización energética recupera aproximadamente 39 TWh de electricidad y 90 TWh de calor de los residuos, y utiliza una fuente de energía local recuperada, ahorrando hasta 50 millones de toneladas de combustibles fósiles importados (ver Figura 3). Las plantas de conversión de residuos en energía también pueden suministrar calefacción y refrigeración a diferentes zonas de la ciudad, ya sea con grandes zonas residenciales o mixtas. Adicionalmente se podrá proveer vapor a las industrias. Estas plantas se denominan Caloric Higt Power– CHP, y son más eficientes que las incineradoras de producción de energía únicamente.



Figura 3. Ciclo de los residuos a energía (CEWEP, 2015). Fuente: <http://www.cewep.eu/what-is-waste-to-energy/>. Modificada por Manuela Vélez Ortega.

Lamers (2017) plantea que para realizar una evaluación adecuada de una tecnología para WtE, se debe evaluar y cuantificar el sistema completo relacionado con la gestión de residuos, como es el pretratamiento, consumo de energía y materiales al ingreso, tecnología utilizada, producción de energía y salida de material. De esa manera se puede hacer un balance adecuadamente comparable.

Las tecnologías WtE han sido desarrolladas y probada en todo el mundo, con más de 1700 plantas en operación con un rendimiento actual de 216 millones de toneladas de residuos sólidos municipales por año (United Nations Environment Programme, 2019). En Europa existen cerca de

500 plantas de WtE¹ que utilizan residuos sólidos urbanos. En EEUU existen 75 plantas (Michaels y Krishnan, 2018) y en Asia Pacífico 1120 (el 70% son plantas para incinerar cenizas), como se puede observar en la Figura 4.

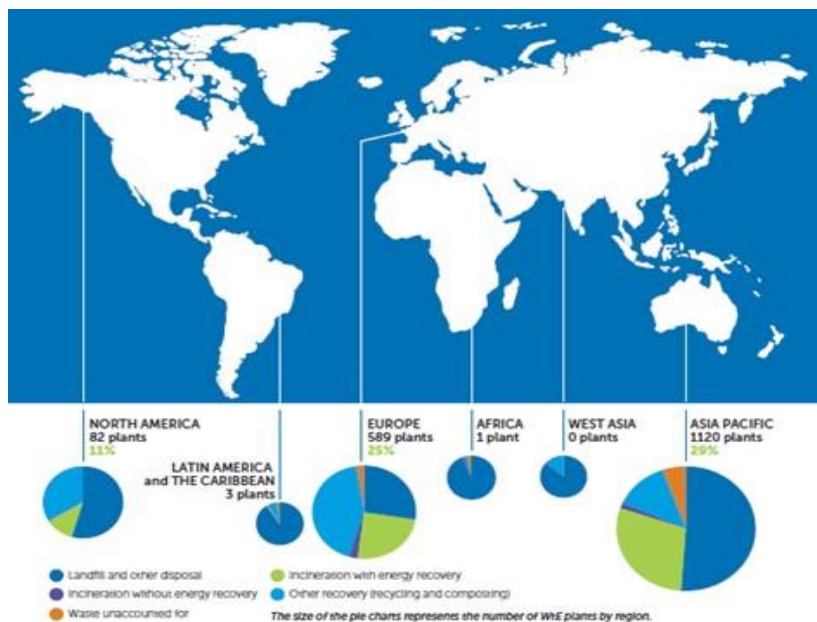


Figura 4. Número de plantas de WtE por región del mundo. Fuente: Waste to Energy considerations for informed decision-making (United Nations Environment Programme, 2019).

Se debe mencionar que si bien la referencia de la Figura 4 se corresponde con el programa de las Naciones Unidas para el Ambiente, existen otras fuentes que presentan cifras un poco menores, sobre todo en las instalaciones de Europa y Asia Pacífico, información que se irá depurando a lo largo del documento. Algunas de las tecnologías de valorización de los residuos se presentan en la Figura 5 y se describen en el numeral 5.4.

¹ Interactive Map of Waste-to-Energy Plants, CEWEP. <http://www.cewep.eu/interactive-map>

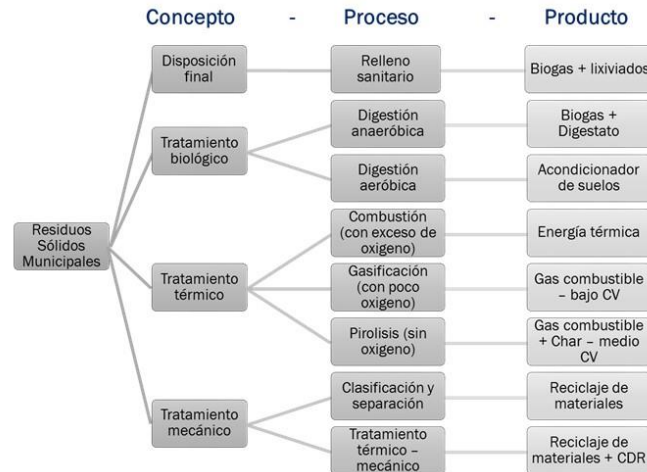


Figura 5. Tecnologías de valorización de residuos. Fuente: Gasification of Waste (Darley, s. f.) y modificado por el autor.

En Colombia, a partir del CONPES 3874 de 2016, se plantean estrategias de minimización, reúso, reciclaje y aprovechamiento de residuos sólidos, de tal manera que se conduzca a la aplicación del concepto de economía circular y se permita desarrollar alternativas para el tratamiento de residuos orgánicos, de demolición y construcción fundamentalmente. Se dejan de lado las tecnologías de valorización energética de residuos y se propone mantener el relleno sanitario como tecnología de referencia para la disposición final de residuos. El Decreto 1784 de 2017 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, plantea acciones para la definición de sitios aptos para la ubicación de plantas de tratamiento, pero en ningún caso establece o define tecnologías posibles para el tratamiento de los residuos sólidos. La Ley 1715 de 2014 (Integración de energías renovables) tiene el objeto de promover el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía (FNCE), principalmente aquellas de carácter renovable, en el sistema energético nacional. Entre otros, permite la utilización de residuos sólidos como FNCE, siendo esto una base para el desarrollo de proyectos de WtE.

El reciclaje con recicladores de oficio es una actividad relevante en Colombia. Por ejemplo, en Medellín existen más de 3.500 familias que subsisten a través de ello (Secretaría de Gestión y Control Territorial - Secretaria de Medio Ambiente, 2016), estableciendo una cadena importante entre reciclador, compraventa e industria. Se debe mencionar además que la exportación de materiales reciclables desde Colombia no es significativa, a pesar de ser un negocio global con

mercados internacionales y amplias redes de suministro y transporte (Bhada-Tata & Hoornweg, 2012) que demanda calidad y flujos constantes, situación que aún no está resuelta en el país.

De acuerdo con lo anterior, la valorización de residuos en Colombia no se ha desarrollado, entre otras, por las siguientes razones:

- Normatividad incipiente en lo relacionado con WtE y altos costos de inversión y operación, valores que no se alcanzan a cubrir con la tarifa de aseo.
- Falta de decisión política.
- Aspectos técnicos como la humedad y el bajo poder calorífico de los residuos.
- Baja capacidad técnica y tecnológica instalada.
- Alta dependencia del reciclaje con personal informal, siendo esta una actividad socialmente sensible, de la cual viven muchas familias.

5.3 Marco normativo asociado al proceso de valorización energética de residuos

Como soporte en la construcción de este proyecto de investigación, fue necesario recoger las normas nacionales e internacionales que intervienen en el desarrollo de las problemáticas analizadas. Sin necesidad de transcribir la extensión de esas normativas, se propone un repaso de manera sucinta por sus contenidos, de tal forma que su aparición en el interior del texto logre una fácil asimilación y comprensión.

La Ley 142 de 1994, en primer lugar, establece condiciones y oportunidades para la llegada de actores privados, diferentes a los entes territoriales o empresas municipales, en la operación de los servicios públicos domiciliarios, permitiendo la libre competencia, lo que en el caso del servicio de aseo ha sido determinante. En la actualidad se puede observar que en 20 de las 32 ciudades capitales de Colombia los operadores de aseo son empresas privadas, las cuales a su vez son grupos empresariales, como Interaseo o Veolia. Entre estas dos empresas se gestionan cerca de 3 millones de suscriptores en el país, y poseen más de 15 rellenos sanitarios regionales (información del autor), situación que ratifica la importancia del sector privado en la prestación de este servicio.

Respecto a la valorización de residuos, se puede manifestar que las normas que más lo abordan en Colombia son el Decreto 1784 de 2017 y su Resolución 938 de 2019, donde se empieza a trabajar el concepto de tratamiento y su relación con la disminución de residuos en el relleno sanitario, la Ley 1715 de 2014, donde se brindan opciones a la producción de energía con residuos o con biomasa, y el CONPES 3874, política que establece la necesidad de volcar al país hacia una economía circular, contexto necesario para la valorización de residuos. No obstante, la normativa en el país respecto a la valorización energética de residuos es aún incipiente.

Las normas en el campo de la gestión de residuos son las siguientes:

- Ley 142 de 1994: Establece el régimen de servicios públicos domiciliarios.
- Resolución 0330 2017: Reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico – RAS.
- Ley 1715 de 2014: Sobre integración de Energías Renovables.
- Ley 1753 de 2015: Plan Nacional de Desarrollo 2014 – 2018.
- Decreto 1077 de 2015: Compilatorio de las normas relacionadas con el agua y saneamiento:
 - Decreto 838 de 2005: Disposición final.
 - Decreto 2981 de 2013: Gestión integral de residuos sólidos.
 - Decreto 596 de 2016: Esquema de la actividad de aprovechamiento en la prestación del servicio público de aseo.
 - Decreto 1784 de 2017: Disposición final y tratamiento (modifica parcialmente el Decreto 838 de 2005).
 - Decreto 2412 de 2018: Incentivo al aprovechamiento de residuos sólidos.
 - Resolución 938 de 2019: Reglamenta el Decreto 1784 de 2017 en lo relativo a las actividades complementarias de tratamiento y disposición final de residuos sólidos en el servicio público.
- Resolución 720 de 2015: Marco Regulatorio de Aseo vigente.
- CONPES 3874 de 2016: Política nacional para la gestión integral de residuos sólidos.
- CONPES 3918: Estrategia para la implementación de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) en Colombia.
- CONPES 3919 Política nacional de edificaciones sostenibles.
- Estrategia Nacional de Economía Circular de 2019

A lo largo del trabajo se referencian, además, algunas Directivas Europeas, por considerarse relevantes para el proceso, y que bien podrán ser utilizadas, como modelo, por los legisladores en Colombia y Latinoamérica:

- Directiva 1999/31/CE. Relativa al vertido de los residuos.
- Directiva 2008/98/EC (2008) sobre los residuos.
- Directiva 2010/75/UE del Parlamento Europeo y del Consejo sobre las emisiones industriales.
- Directiva 2011/92/EC. Evaluación de los efectos de determinados proyectos públicos y privados sobre el medio ambiente.
- Directiva (UE) 2015/1127 de la Comisión del 10 de julio de 2015 por la que se modifica el anexo II de la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, sobre los residuos.

En los numerales 5.3.1, 5.3.2, 5.3.3, 5.3.4 y 5.3.5 se detallan el CONPES 3874, el Decreto 1077 de 2015, la Ley 1715 de 2014 y algunas Directivas de la Unión Europea.

5.3.1 Política Nacional para la gestión integral de residuos sólidos, CONPES 3874

La Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos (Departamento Nacional de Planeación, 2016) es una política nacional de interés social, económico, ambiental y sanitario. Esta política se compone de cuatro ejes estratégicos. El primer eje busca adoptar medidas encaminadas hacia (i) la prevención en la generación de residuos; (ii) la minimización de aquellos que van a sitios de disposición final; (iii) la promoción de la reutilización, aprovechamiento y tratamiento de residuos sólidos; y (iv) evitar la generación de gases de efecto invernadero. Como complemento, el segundo eje apunta a mejorar la cultura ciudadana, la educación e innovación en gestión integral de residuos sólidos para incrementar los niveles de separación en la fuente, de aprovechamiento y de tratamiento. Los dos ejes adicionales están relacionados con la generación de un entorno institucional propicio para la coordinación entre actores, que promueva la eficiencia en la gestión integral de residuos sólidos. En este sentido, el tercer eje propone asignar roles específicos y claros a las entidades participantes para que lideren las actividades correspondientes, como el tratamiento de residuos orgánicos y el fortalecimiento de los sistemas urbanos de reciclaje inclusivo, entre

otros. Por último, el cuarto eje desarrolla acciones para mejorar el reporte de monitoreo, verificación y divulgación de la información sectorial para el seguimiento de la política pública de gestión integral de residuos sólidos.

Este documento CONPES busca, entre otros aspectos, que Colombia logre la reducción de un 20% de las emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI) para el año 2030, objetivo que es posible mediante acciones en el reciclaje, el compostaje o la biodigestión, pero sobre todo en el manejo adecuado del biogás producido en los rellenos sanitarios.

Dentro de las estrategias que se plantean para avanzar hacia este tipo de economía circular desde la gestión integral de residuos sólidos, están: (i) promover el avance gradual hacia una economía circular, a través del diseño de instrumentos en el marco de la gestión integral de residuos sólidos; (ii) promover la cultura ciudadana, la educación e innovación en gestión integral de residuos como bases para fomentar la prevención, reutilización y adecuada separación en la fuente; (iii) generar un entorno institucional propicio para la coordinación entre actores que promueva la eficiencia en la gestión integral de residuos sólidos, y (iv) implementar acciones para mejorar el reporte, monitoreo, verificación y divulgación de la información sectorial para el seguimiento de esta política pública.

Como se puede observar, el CONPES 3874 establece las bases para que Colombia comience a trabajar en torno al aprovechamiento y tratamiento de los residuos, por lo tanto, abre el camino para la valorización de los residuos sólidos.

5.3.2 Decreto 1077 de 2015

Corresponde al Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio, compilatorio de normas reglamentarias existentes y posteriores respecto a la gestión de los residuos sólidos, que se van agregando en la medida en que se generan. Las normas de residuos son referidas en el Título 2, y entre estas se encuentran los Decretos 838 de 2005, 2981 de 2013, 596 de 2016, 1784 de 2017 y 2414 de 2018, entre otras.

El Decreto 838 de 2005 hace énfasis en las condiciones técnicas de diseño, ubicación y operación de rellenos sanitarios. Igualmente, reglamenta el procedimiento a seguir por parte de las

entidades territoriales para definir las áreas susceptibles para la ubicación de rellenos sanitarios. Esta norma fue actualizada parcialmente y complementada por el Decreto 1784 de 2017, el cual modifica el capítulo 6 del 1077 en el que se reglamentan las condiciones bajo las cuales deberá desarrollarse la actividad complementaria de tratamiento de residuos sólidos en la prestación del servicio público de aseo. Este Decreto y la Resolución 938 de 2019 se describen con más detalle en el numeral 5.3.4.

Por su parte, el Decreto 2981 de 2013 reglamenta las actividades principales y complementarias del servicio público de aseo y, entre otros aspectos, señala la obligatoriedad para los usuarios de realizar la separación en la fuente, y para los municipios, de elaborar y mantener actualizado un Plan para la Gestión Integral de Residuos Sólidos en el ámbito local o regional según el caso, de conformidad con la metodología definida por la Resolución 0754 de 2014.

Además, el Decreto 2981 incorpora iniciativas frente al tratamiento de residuos, en la medida que establece responsabilidades del aprovechamiento y las rutas selectivas, elementos necesarios para comenzar a disminuir presión sobre los sitios de disposición final, y busca desviar aquellos materiales que puedan ser reciclados, primera opción en la jerarquización de la cadena de valor de los residuos sólidos.

El Decreto 596 de 2016, por el cual se modifica y adiciona el Decreto 1077 de 2015, en lo relativo con el esquema de la actividad de aprovechamiento del servicio público de aseo y el régimen transitorio para la formalización de los recicladores de oficio, y se dictan otras disposiciones. Este Decreto en su capítulo 5, tiene como objeto definir el esquema operativo de la actividad de aprovechamiento y la transitoriedad para el cumplimiento de las obligaciones que deben atender los recicladores de oficio y las organizaciones que estén en proceso de formalización, como personas prestadoras de la actividad de aprovechamiento en el servicio público de aseo, para todo el territorio nacional.

Como criterios orientadores se cuenta con escalas diferenciales, progresividad para formalización, colaboración entre los actores participantes, responsabilidad social, implementación de largo plazo y reconocimiento de la labor a los recicladores de oficio.

De esta manera se obliga a materializar un cambio en la jerarquía de las actividades de gestión de los residuos sólidos, enfocándose en la no generación y en el aprovechamiento, lo cual también redundará en las opciones de valorización de los residuos sólidos.

Por último, el Decreto 2412 de 2018, relativo a los incentivos al aprovechamiento, abre todo un abanico de posibilidades en torno al financiamiento tanto de los sistemas de aprovechamiento como de valorización de residuos, aunque es importante destacar que los recursos posibles son bajos, incluso para las ciudades capitales (Medellín aproximadamente \$5.000 millones/año), dadas las grandes inversiones que demanda una infraestructura de tratamiento.

5.3.3 Ley 1715 de 2014

Esta norma regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional. El Artículo 1 manifiesta el objeto de la Ley:

La presente ley tiene por objeto promover el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable, en el sistema energético nacional, mediante su integración al mercado eléctrico, su participación en las zonas no interconectadas y en otros usos energéticos como medio necesario para el desarrollo económico sostenible, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la seguridad del abastecimiento energético.

El Artículo 18 establece todo lo correspondiente a la generación de energía con residuos sólidos:

Artículo 18. Energía de Residuos.

- *Será considerado como FNCER el contenido energético de los residuos sólidos que no sean susceptibles de reutilización y reciclaje.*
- *Será considerado como FNCER el contenido energético tanto de la fracción biodegradable, como de la fracción de combustible de los residuos de biomasa.*
- *Será considerado como fracción combustible de los residuos aquella que se oxide sin aporte de energía una vez que el proceso de combustión se ha iniciado.*
- *Se faculta al Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, en colaboración con las Corporaciones Autónomas, para fijar los objetivos de valorización energética para algunas tipologías concretas de residuos de interés energético a partir de criterios ambientales de la*

gestión de residuos, de sostenibilidad ambiental y económica. Para ello, establecerá reglamentariamente un mecanismo que indicará los sujetos obligados e incluirá un sistema que permita la supervisión y certificación, así como un régimen de pagos compensatorios.

- *Se faculta al Ministerio de Minas y Energía para reglamentar normas técnicas que definan los parámetros de calidad que han de cumplir los combustibles sólidos recuperados obtenidos a partir de diferentes residuos. Además, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, en conjunto con el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural y el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, desarrollarán las estrategias conjuntas para que los combustibles sólidos recuperados que alcancen los parámetros que en dichas normas se consideren necesarios, sean destinados a la valorización energética. Dichas normas técnicas, serán definidas teniendo en cuenta las directrices comunitarias e incluirán, entre otros aspectos, categorías, calidades y ámbitos de aplicabilidad, así como sistemas que permitan el control de calidad o certificación de tales combustibles.*

Es importante reconocer que a la fecha las reglamentaciones de las que hablan las dos últimas viñetas aún no se han concretado y son importantes para el desarrollo de estas tecnologías.

5.3.4 Decreto 1784 de 2017 y Resolución 938 de 2019

El Decreto 1784 de 2017 reglamenta, en el capítulo 6 del 1077, las condiciones bajo las cuales deberá desarrollarse la actividad complementaria de tratamiento de residuos sólidos en la prestación del servicio público de aseo. Plantea entre otros lo siguiente:

- “Artículo 2.3.2.6.5. Selección de Tratamiento. La selección de tratamiento o tratamientos a implementar debe considerar, entre otros, su complejidad, acorde con la caracterización de residuos sólidos según el tratamiento a implementar, los estudios de población, proyección de generación de residuos, análisis de viabilidad financiera y económica, así como la sostenibilidad empresarial. Cuyos criterios serán definidos por el Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio”.
- Así como para disposición final, determina que para instalar infraestructuras de tratamiento se deben establecer condicionamientos privilegiados desde las normas de ordenamiento territorial, como por ejemplo el que se puedan considerar de interés público y social.

Destaca que una estación de transferencia contribuye con la valorización, en la medida en que permite desde un lugar de la ciudad, transportar los residuos para diversos sitios, ya sean relleno sanitarios o plantas de tratamiento. Incluso propone, de ser posible, que en este mismo sitio se desarrolle un sistema de tratamiento o aprovechamiento, y así disminuir costos de transporte.

Se categorizan los sitios de disposición final en función de su tamaño: Categoría I. De 0 a 50 ton/día; Categoría II. Mayor de 50 hasta 500 ton/día; Categoría III. Mayor de 500 hasta 3000 ton/día; Categoría IV. Mayor de 3000 ton/día.

Se recogen los requisitos mínimos para el diseño de nuevos rellenos sanitarios o ampliación de existentes, considerando lo establecido en el Decreto 838 de 2005, como estudios preliminares, diseños de llenado, cálculos, instrumentación, infraestructura del relleno sanitario y presupuesto.

Se plantea la posibilidad de realizar minería de rellenos, con el fin de optimizar el espacio, así como la posibilidad de establecer en estos sitios plantas de tratamiento de residuos sólidos, para ello incluye los numerales 88 al 95 en el Artículo 2.3.2.1.1 del Decreto 1077 de 2015:

88. Tratamiento. Es la actividad del servicio público de aseo, alternativa o complementaria a la disposición final, en la cual se propende por la obtención de beneficios ambientales, sanitarios o económicos, al procesar los residuos sólidos a través de operaciones y procesos mediante los cuales se modifican las características físicas, biológicas o químicas para potencializar su uso. Incluye las técnicas de tratamiento mecánico, biológico y térmico. Dentro de los beneficios se consideran la separación de los residuos sólidos en sus componentes individuales para que puedan utilizarse o tratarse posteriormente, la reducción de la cantidad de residuos sólidos a disponer y/o la recuperación de materiales o recursos valorizados.

En resumen, respecto al componente de tratamiento, la norma es general y no especifica sus diferentes tipologías, ni cuales se podrían aplicar en Colombia. Lo que plantea es que para seleccionar e implementar un sistema de tratamiento se deben tener en cuenta los resultados de la caracterización de los residuos del municipio, las proyecciones de población y generación de residuos, y realizar análisis de viabilidad financiera, económica y de sostenibilidad empresarial. Para todo lo anterior y otros componentes aquí no especificados, el Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio definirá los criterios mínimos para seleccionar el tipo de tratamiento o tratamientos.

En 2019 se promulga la Resolución 938 para reglamentar las actividades complementarias de tratamiento y disposición final de residuos sólidos dentro del servicio público de aseo. La

Resolución define, entre otras, qué áreas deberían ser las más adecuadas para desarrollar sistemas de tratamiento (por ejemplo, rellenos sanitarios). Además, en su Artículo 7, plantea postulados y criterios para la selección de sistemas de tratamiento, en los cuales deben priorizarse:

- Garantizar el saneamiento básico.
- Asegurar la prestación del servicio de aseo.
- Realizar previamente un análisis costo–beneficio entre el sistema de tratamiento y la disposición final en relleno sanitario.
- Garantizar la sostenibilidad del sistema de tratamiento seleccionado.
- Realizar el análisis tarifario de la implementación de la alternativa.
- Definir el tamaño del proyecto, ya sea tratamientos térmicos, biológicos o mecánico biológico, entre otros.

5.3.5 Directivas de la Unión Europea

A continuación, se describen algunas Directivas Europeas que se relacionan con la valorización energética de residuos.

- **Directiva 1999/31/CE.** Relativa al vertido de los residuos: Su objeto se relaciona con las condiciones para la disposición de residuos en vertederos, medidas, procedimientos y orientaciones, para reducir en lo posible los impactos al ambiente (agua, aire, suelo) incluido el efecto invernadero.
- **Directiva 2000/76/CE.** Relativa a la incineración de residuos. Su objeto es impedir o limitar, en la medida de lo posible, los efectos negativos sobre el medio ambiente, especialmente la contaminación causada por las emisiones en la atmósfera, el suelo y las aguas superficiales y subterráneas, así como los riesgos para la salud humana derivados de los procesos de incineración y co-incineración de residuos.
- **Directiva 2008/98/EC.** Sobre los residuos. Esta Directiva establece medidas destinadas a proteger el medio ambiente y la salud humana, mediante la prevención o la reducción de los impactos adversos de la generación y gestión de los residuos, la reducción de los impactos

globales del uso de los recursos y la mejora de la eficacia de dicho uso. El Artículo 4 define la jerarquía para la gestión de los residuos.

- **Directiva 2009/28/CE.** Parlamento Europeo y del Consejo. Establece un marco común para el fomento de la energía procedente de fuentes renovables. Fija objetivos nacionales obligatorios en relación con el consumo final bruto de energía y con la cuota de energía procedente de fuentes renovables en el transporte. Define criterios de sostenibilidad para los biocarburantes y biolíquidos.
- **Directiva 2010/75/UE.** Sobre las emisiones industriales. Establece normas sobre la prevención y el control integrados de la contaminación procedente de las actividades industriales. Entre ellas: Valorización o eliminación de residuos peligrosos de una capacidad superior a 10 t/día, valorización o eliminación de residuos en instalaciones de incineración o de co-incineración de residuos, eliminación de residuos no peligrosos con una capacidad superior a 50 t/día, vertederos, almacenamiento temporal superficiales o subterráneos de residuos peligrosos.
- **Directiva 2011/92/EC.** Evaluación de los efectos de determinados proyectos públicos y privados sobre el medio ambiente. Trata entre otros sobre instalaciones para deshacerse de residuos no peligrosos por medio de la incineración o tratamiento químico como se define en el epígrafe D9 del anexo I de la Directiva 2008/98/CE, con una capacidad superior a 100 t/día.
- **Directiva (UE) 2015/1127.** Modifica el anexo II de la Directiva 2008/98/CE, sobre los residuos y básicamente el valor de la fórmula de eficiencia energética durante la valorización de residuos.
- **Directiva 2018-851.** Modifica la Directiva 2008-98-CE. Establece medidas destinadas a proteger el medio ambiente y la salud humana mediante la prevención o la reducción de la generación de residuos y de sus impactos negativos, la reducción del impacto global del uso de los recursos y la mejora de la eficiencia de dicho uso, elementos cruciales para efectuar la transición a una economía circular y garantizar la competitividad de la Unión a largo plazo.

5.4 Alternativas de valorización energética de residuos

Existen diferentes alternativas de tratamiento térmico de los residuos sólidos, entre otras, la combustión o incineración con aprovechamiento energético, pirólisis, y gasificación. Cada una de

ellas produce resultados diferentes, los cuales están asociados a los tipos de residuos gestionados y a las condiciones de operación (presencia o ausencia de oxígeno principalmente). Estas alternativas requieren complementarse con sistemas de pretratamiento, que van desde la separación en origen con procesos de recolección selectiva, o el tratamiento mecánico de los residuos como trituración o separación por tamaño y tipo de material. De igual manera, se pueden mezclar con residuos que posean mayor poder calorífico, como las llantas fuera de uso, de tal forma que se mejoren las condiciones operativas de los sistemas de WtE.

Una de las diferencias importantes entre las alternativas de tratamiento térmico es que la combustión con aprovechamiento energético es un proceso de una sola fase y un solo reactor, donde se producen gases y vapor; mientras que en la gasificación o en la pirólisis se requieren dos sistemas: en el primer sistema se generan gases o líquidos según el proceso (gasificación: gases y sólidos, pirólisis: gases, líquidos y sólidos), y en el segundo se tratan o se queman estos gases o líquidos para la producción de energía, de productos químicos (etanol, metanol, etc.), o de combustibles líquidos o sólidos (Lamers, 2017).

En la Figura 6 se presentan las tecnologías de valorización de residuos que se analizaron en la presente investigación. Cualquiera de estas alternativas para el aprovechamiento de residuos en producción de energía (WtE) contribuye positivamente frente a la disposición final (Bosmans, Vanderreydt, Geysen, & Helsen, 2013) en relleno sanitario, dado que:

- Reducen el volumen del residuo entre un 50% y un 90%, los cuales tienen a su vez cualidades de no ser contaminantes.
- Permiten eliminar algunas sustancias tóxicas, así como agentes patógenos.
- Utilizan el poder calorífico de los residuos y disminuyen el uso de recursos naturales no renovables, como es el caso de los combustibles fósiles en la producción de energía.
- Disminuyen la emisión de gases efecto invernadero al utilizar residuos orgánicos, evitando así la producción de CH₄ y CO₂ en el relleno sanitario, durante el proceso de descomposición.
- Permiten la recuperación de metales férricos y no férricos en los procesos de separación, al igual que en las escorias.
- Permiten el aprovechamiento de los gases de combustión en la generación de energía térmica o eléctrica.

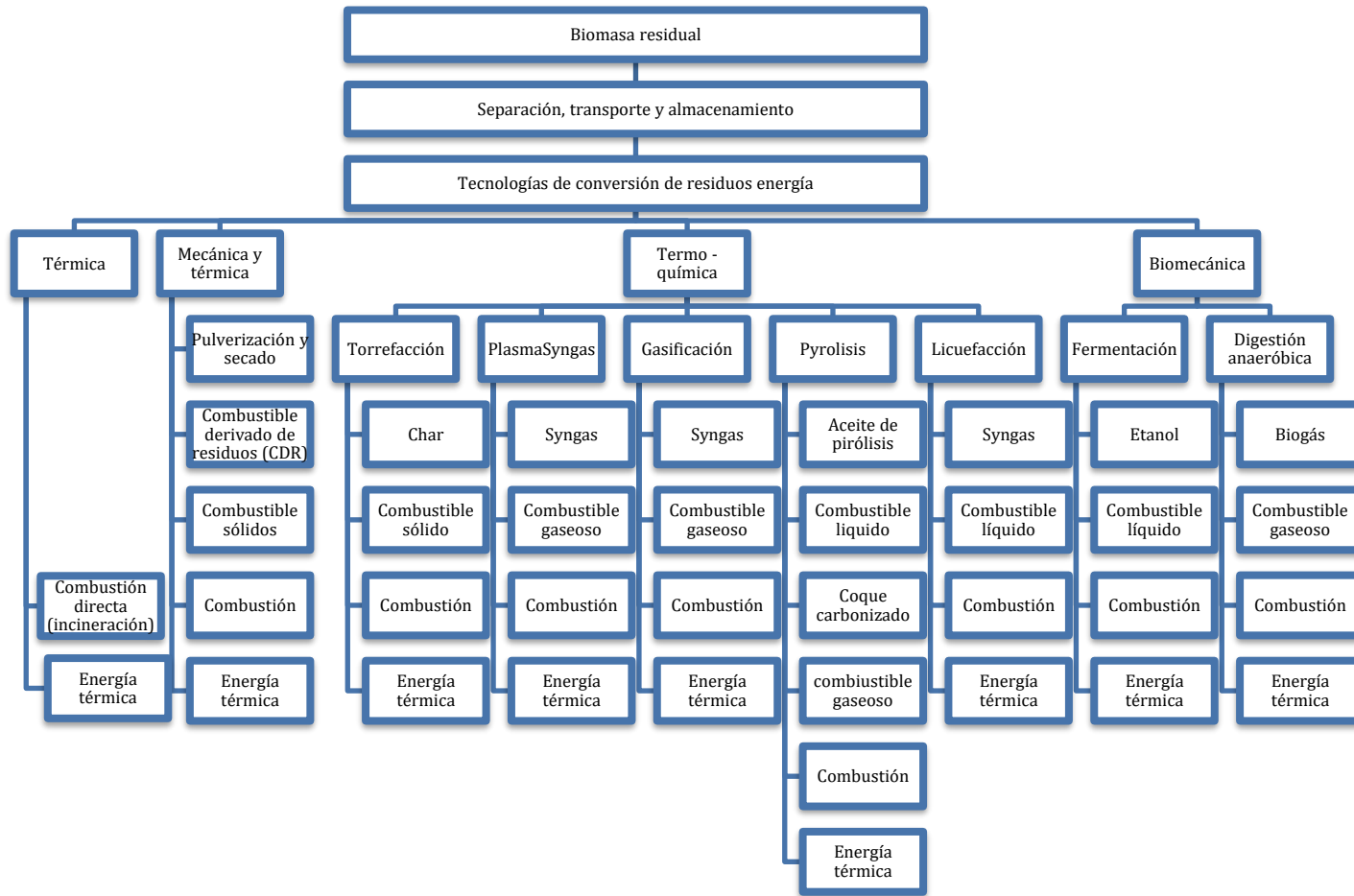


Figura 6. Procesos de las tecnologías de valorización energética de residuos. Fuente: tomado de **Bosmans, Vanderreydt, Geysen, y Helsens (2013)**, y adaptado por el autor.

De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía (EIA, por sus siglas en inglés) en la reunión de trabajo efectuada en Ciudad del Cabo en 2013, se mencionó que los países y zonas del mundo que han utilizado mayor cantidad de residuos como combustible para generar energía son: Europa con alrededor del 50%, EEUU, con cerca del 20%, y Japón y Singapur con el 100% (International Energy Agency - IEA Bioenergy, 2013). Estos porcentajes representaron la utilización de 216 millones de toneladas de residuos sólidos urbanos en incineración que permitieron producir 110 GW de energía, reconociendo que es más eficiente una planta que combine Calor y Potencia (CHP). La Figura 7 muestra la ubicación en el mundo de los países que han utilizado residuos para producir energía.

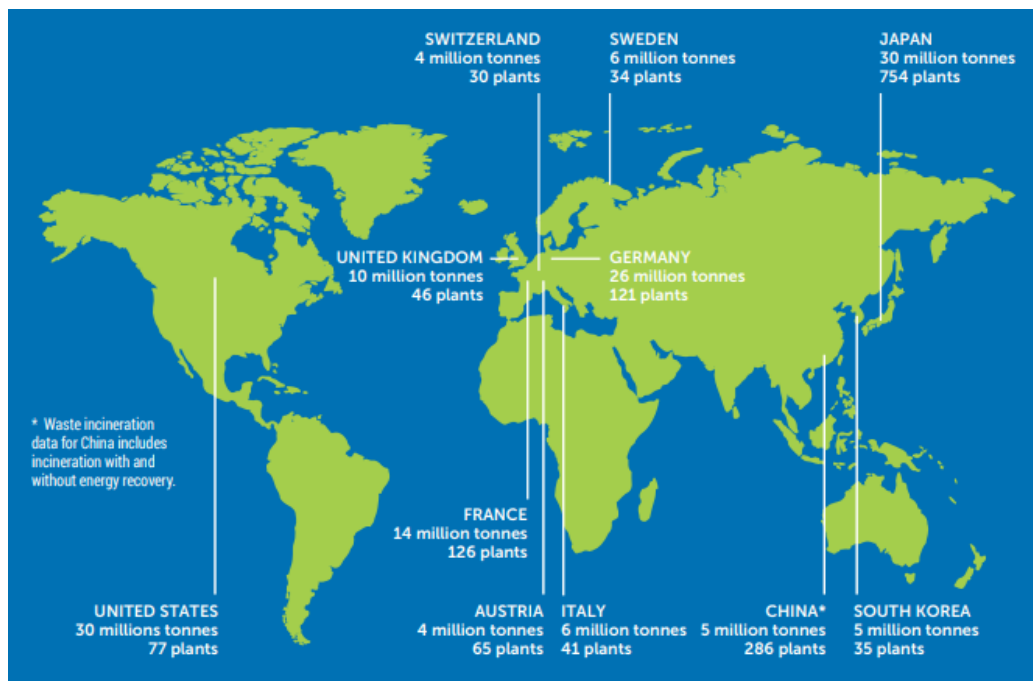


Figura 7. Países del mundo que tienen el mayor número de plantas de WtE. Fuente: Waste-to-Energy: Considerations for Informed Decision-Making (United Nations Environment Programme, 2019).

Es importante manifestar que existe información con un número determinado de plantas de WtE en el mundo, y que este número varía dependiendo del autor o la publicación, sobre todo respecto a las plantas instaladas en el continente asiático; primero por la falta de información oficial (en China, por ejemplo), y segundo por la interpretación de la información presentada, como es el caso de las plantas de WtE en Japón. Algunas de ellas corresponden a plantas para el tratamiento de las cenizas o escorias producto del tratamiento de los residuos sólidos. Se debe reconocer adicionalmente que la barrera del idioma de los países asiáticos, como son: chino mandarín,

coreano o japonés, para solo poner unos ejemplos, no permiten una fácil comprensión de la información en occidente.

A continuación, se describen cada una de las tecnologías de WtE que hacen parte del análisis del presente proyecto de investigación, a saber: Combustión con aprovechamiento energético, Gasificación, Pirólisis y Biodigestión. A manera de complemento también se describe la alternativa de disposición final en relleno sanitario.

5.4.1 Combustión con aprovechamiento energético

Es cualquier unidad técnica o equipo, fijo o móvil, dedicado al tratamiento térmico de residuos con o sin recuperación del calor producido por la combustión; mediante la incineración por oxidación de residuos, que incluye procesos de tratamiento térmico, tales como pirólisis, gasificación y proceso de plasma (Directiva 2010/75/UE).

La incineración de residuos sólidos municipales (MSW, por sus siglas en inglés) es la quema de desechos en un proceso controlado dentro de una instalación específica que se ha construido para este propósito (la temperatura de reacción está entre 850 y 1450°C). Su objetivo principal es reducir el volumen y la masa de los residuos entre un 70% y un 85% (Mavropoulos, 2016) y también hacer que los residuos resultantes sean químicamente inertes, mediante un proceso de combustión autotérmica, sin la necesidad de combustible adicional, (Mutz, Hengevoss, Hugi, & Gross, 2017). Es una reacción exotérmica en la que los compuestos orgánicos se oxidan a CO₂ y H₂O y la energía química se convierte en energía térmica, y no requiere de la inyección de otro combustible.

Una instalación de conversión de residuos en energía puede generar una gama de productos como electricidad, calefacción o refrigeración urbana y vapor para procesos industriales, entre otros. De acuerdo con las referencias revisadas y analizadas por parte del autor, se puede decir que el desempeño ambiental de las plantas de conversión de residuos en energía es superior a la disposición final en rellenos sanitarios, con una menor huella de carbono, toda vez que se controla la emisión de gases efecto invernadero y se utilizan residuos como combustible. Los residuos

generados en una planta de incineración son en general cenizas y/o escorias, cenizas de calderas y polvo de filtros (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino de España, 2011).

Las plantas que utilizan la cogeneración de la energía térmica (calefacción y refrigeración), junto con la generación de electricidad, pueden alcanzar eficiencias óptimas del 80%, mientras que aquellas que generan solamente electricidad alcanzarán eficiencias máximas de aproximadamente el 20%, (Mutz, et al., 2017). Este es uno de los cambios más grandes que se han suscitado a lo largo de la historia de la incineración de los residuos, así como el desarrollo de los sistemas de control para evitar la contaminación por efecto de los gases emitidos.

La tecnología de conversión de desechos en energía más ampliamente utilizada y probada son los hornos de parrilla móvil en los que se queman los desechos. Este proceso es flexible y puede usarse con o sin pretratamiento, como la recuperación de material (Ramboll, 2019). Adicional a este, existen los hornos rotativos y hornos fluidizados, los cuales se utilizan generalmente para residuos peligrosos o clínicos, o especiales como pastosos (requieren mayor inducción de energía) respectivamente.

En la Figura 8 se observa un diagrama general de una planta de combustión con aprovechamiento energético con sus componentes.

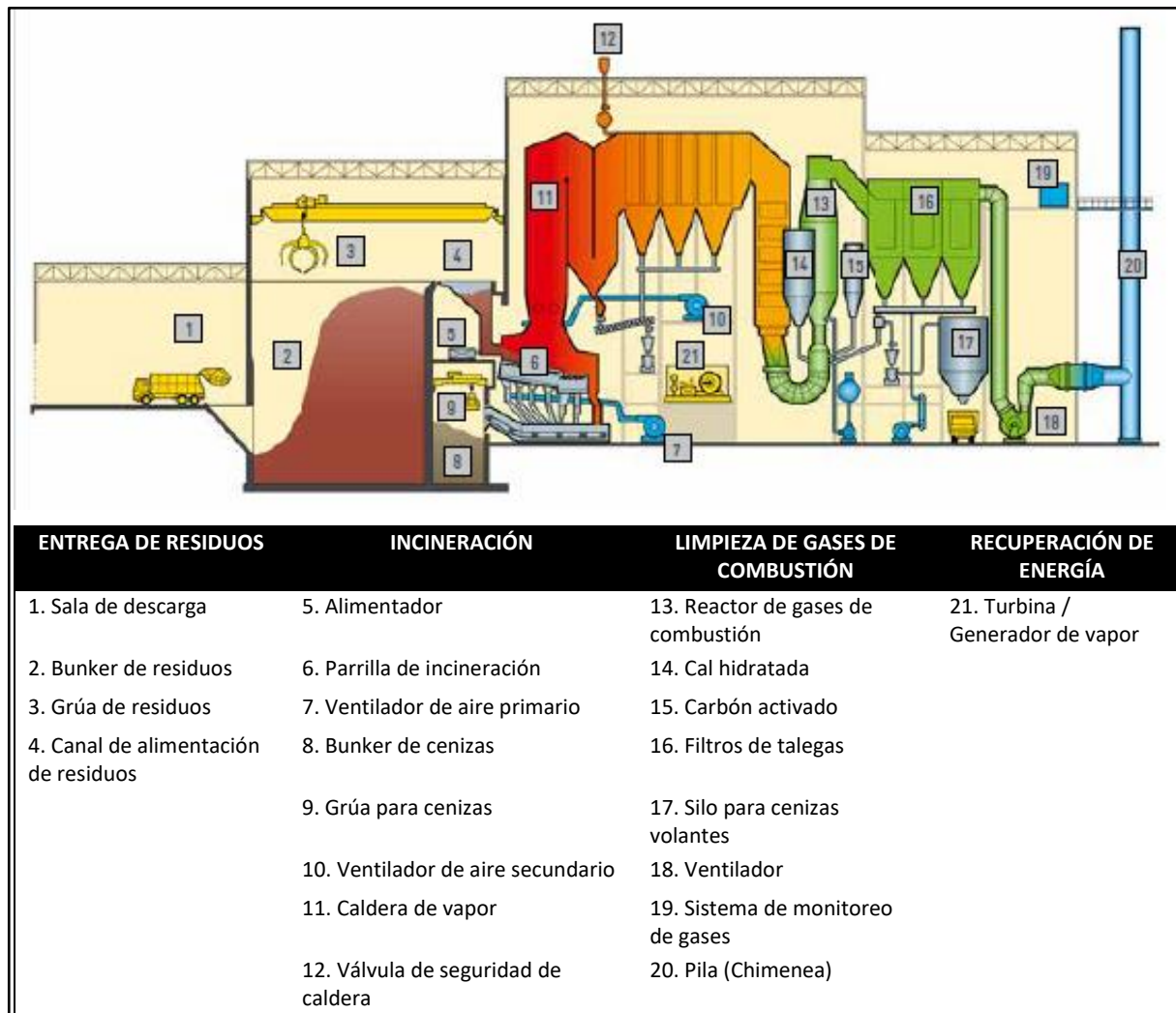


Figura 8. Diagrama de una planta de residuos a energía. Fuente: (Mutz, Hengevoss, Hugi, & Gross, 2017) – planta del Grupo Doosan Letjes GMBH, y traducida por el autor.

El listado que presenta la Figura 8 refleja lo que se plantea en diferentes artículos y documentos, y es que el número de unidades para realizar el tratamiento de los gases y partículas generados en la combustión es muy amplio, toda vez que la combinación de residuos y sustancias que allí se tratan, al ser destruidas liberan compuestos o componentes que pueden ser muy contaminantes, lo cual demanda tratamientos y controles robustos y eficientes, que son diferentes según el tipo de planta y fabricante. Estos gases y partículas se pueden tratar vía seca, húmeda, semi húmeda o mediante una combinación de sistemas (Neuwahl, 2019).

La necesidad de implementar controles en las emisiones gaseosas ha sido una situación de aprendizaje, experiencias y quejas de las comunidades por muchos años, pero sobre todo por la

necesidad de disminuir impactos al ambiente, lo cual se ve reflejado en el establecimiento de normas y Directivas en los diferentes países y territorios, siendo a su vez más estrictas en Europa que en Estados Unidos, pero menos que en Japón. Estos argumentos, por su parte, son los que han limitado la construcción de nuevas plantas en España, y que vienen presionando a los países del norte de Europa (Suecia, Noruega, Dinamarca, entre otros) a buscar actualizar aquellas instalaciones que tienen más de 20 años de operación.

Estas normas y controles buscan evitar la afectación de la salud de las personas, así como al ambiente, y por ello plantean límites a los posibles contaminantes que se van a generar, ya sea en forma líquida, gaseosa o sólida. En (Mohamed, 2015), (Furrer & Walther, 2018) y (Joint Research Centre, 2018) así como en las Directivas Europeas o en la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés), se encuentran diferentes referencias sobre tratamientos y sistemas de control en los procesos de combustión con recuperación de energía. Adicionalmente, las características propias de las ciudades con condiciones de saturación atmosférica, como por ejemplo varias ciudades latinoamericanas (Bogotá, México, Santiago, Sao Paulo, Medellín) deberían establecer restricciones particulares para las emisiones atmosféricas.

Como lo expresan Neuwahl, Cusano, Gómez Benavides, Holbrook, y Roudier (2019), “Los sistemas de limpieza de gases de combustión se construyen a partir de una combinación de unidades de proceso individuales que juntos proporcionan un sistema de tratamiento general para los gases de combustión”; es decir, depende del material que se vaya a incinerar, ya sean residuos ordinarios, peligrosos o lodos, entre otros, se podrán generar diferentes tipos de gases, por lo tanto su tratamiento será específico.

La norma en Colombia que reglamenta las emisiones de fuentes fijas es la Resolución 909 de 2008, (adicionalmente se debe considerar la Resolución 2254 de 2017 sobre calidad del aire). La Resolución 909 determina los estándares de emisión admisibles de contaminantes al aire para instalaciones donde se realice tratamiento térmico a residuos y/o desechos peligrosos (Capítulo XII), así como para residuos no peligrosos (Capítulo XIII), y los estándares admisibles en el Artículo 56 de la Resolución 909 de 2008, (ver Tabla 3) se definen los estándares de emisión admisibles de contaminantes para instalaciones de incineración de residuos no peligrosos a condiciones de referencia con oxígeno de referencia del 11%.

Tabla 3.

Estándares de emisión admisibles de contaminantes al aire para instalaciones de incineración de residuos no peligrosos a condiciones de referencia (25 °C, 760 mm Hg) con oxígeno de referencia del 11%.

Instalaciones de incineración de residuos no peligrosos	Promedio	Estándares de emisiones admisibles (mg/m ³)							
		MP	SO ²	NO _x	CO	HCL	HF	Hg	Hct
Instalaciones de incineración con capacidad igual o mayor a 500 kg/hora	Promedio diario	10	50	200	50	10	1	0,03	10
	Promedio horario	20	200	400	100	40	4	0,05	20
Instalaciones de incineración con capacidad igual o menor a 500 kg/hora	Promedio diario	15	50	200	50	15	1	0,05	10
	Promedio horario	30	200	400	100	60	4	0,1	20

Fuente: tabla 33 de la Resolución 909 de 2008.

En el Anexo 1 de definiciones (Resolución 909 de 2008) se plantea la siguiente definición:

Incinerador: Equipo destinado a la incineración de residuos, mediante procesos térmicos, constituido principalmente por dos cámaras instaladas de tal manera que los gases generados por la combustión parcial de los residuos en la primera cámara pasan a una segunda cámara o de post-combustión dentro de regímenes de tiempo y temperatura controlados permitiendo una combustión total, para lo cual cada cámara debe contar con sus respectivos dispositivos de control de temperatura y quemadores.

Independientemente de lo planteado en la Resolución 909 de 2008, norma que se ha complementado con la Resolución 2254 de 2017, respecto a calidad del aire, el Gobierno Nacional podrá recurrir adicionalmente a normas Europeas como la Directiva 2000/76 CE sobre Incineración (Parlamento Europeo; Consejo de la Unión Europea, 2000), o de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, el Ministerio de Medio Ambiente de Japón, o donde considere que se pueden ajustar aún más los requerimientos locales.

El número de plantas de combustión con aprovechamiento energético en el mundo varía según la publicación de referencia. Por ejemplo, en Waste-to-Energy: Considerations for Informed Decision-Making (United Nations Environment Programme, 2019) se dice que existen más de 1700 plantas, de las cuales el 90% funcionan en países desarrollados. En el estudio de factibilidad de plantas WtE para la Región Metropolitana de Chile (Furrer & Walther, 2018) se presenta un número de 1600 plantas en el mundo, reconociendo la dificultad de detallar mejor la información en particular para los países asiáticos debido a la barrera del idioma. Al investigar en fuentes

locales se encuentra que en Estados Unidos funcionan 84 plantas (U.S. Energy Information Administration, 2019), en Europa 492 (Confederation of European Waste-to-Energy Plants-CEWEP, 2019) (ver Figura 9), en China 286 (National Bureau Statistics of China, 2018), en Japón y Corea del Sur 789 (United Nations Environment Programme, 2019). En India entre 5 y 8 (Koshy, 2019) (Larios Bruna, 2013) y 1 en África, debido, principalmente, a las grandes inversiones que se deben realizar, las capacidades tecnológicas requeridas, la disposición de terrenos para disposición final y la rivalidad con fuentes de energía más económicas como la hidráulica; se tiene una menor rigurosidad y supervisión a la aplicación de normas ambientales, así como una gran cantidad de personas que dependen del sector informal del reciclaje, entre otras razones.

Otro aspecto que se debe considerar es que los países del norte de Europa y Japón, particularmente, tienen unas condiciones climáticas (frío gran parte del año) y de falta de espacio en sus territorios (Japón, los Países Bajos, entre otros), que obligan a sus estados a tomar decisiones de prohibir los rellenos sanitarios y obtener fuentes alternativas de generación de energía limpia, situaciones que contribuyeron parcialmente al cambio tecnológico que han tenido los sistemas de gestión de residuos en los últimos 20 años, pasando de tener plantas para la destrucción de los residuos, a plantas para generar energía eléctrica y térmica.

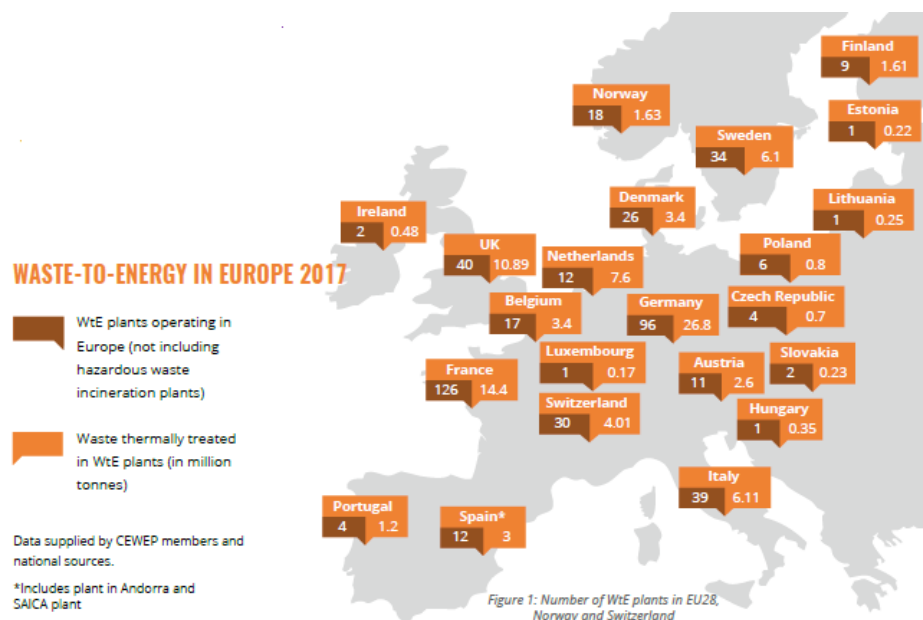


Figura 9. Residuos a energía en Europa en 2017. Fuente: (Confederation of European Waste-to-Energy Plants- CEWEP, 2019).

El crecimiento en la construcción de nuevas plantas en el mundo se está dando fundamentalmente en Australia y China. Países como México, Brasil y Argentina también están dando pasos en estas tecnologías. Por ejemplo, México definió en 2018 la construcción de una planta para 4500 Ton/día, (Furrer & Walther, 2018), aunque hasta finales de 2019 no ha comenzado su construcción fundamentalmente por factores políticos. En la Tabla 4 se puede observar un listado con algunos países y regiones del mundo, el número de plantas de WtE activas y la capacidad instalada por año y día.

Tabla 4.

Plantas WtE en algunas regiones y países.

País / Región	plantas WtE	Capacidad instalada millones Ton/año	Ton/día Planta*	Fuente
Estados Unidos	84	30	1.145	(United Nations Environment Programme, 2019)
Europa	492	96	623	(Confederation of European Waste-to-Energy Plants- CEWEP, 2019)
China	286	93	1.042	(National Bourou Statistics of China, 2018)
Japón	754	30	128	(United Nations Environment Programme., 2019)
Corea el Sur	35	5	458	
Total	1.651	254	492	

*El promedio Ton/día se extrae al dividir el total año por 312 días hábiles del año.

Fuente: Diversas fuentes ajustadas por el autor.

Las tecnologías de combustión se encuentran tan desarrolladas en el mundo, que al visitar diferentes instalaciones (Miami, Paris, Mallorca) es posible darse cuenta de que no generan, en su funcionamiento, malos olores, desorden o suciedad, toda vez que son procesos cerrados, seguros y manejados técnica y tecnológicamente. En la Foto 1 se puede observar una vista general de la Planta de West Palm Beach Miami, así como la ventana del horno incinerador, al cual se puede acceder fácilmente, previa concertación de una visita.



Foto 1. Vista general y del horno de la planta de West Palm Beach Miami. Fuente: archivo del autor.

- **Combustibles sólidos recuperados – CSR.**

Capítulo aparte de la combustión con aprovechamiento energético se plantea con los combustibles sólidos recuperados (CSR), toda vez que este puede ser es un gran insumo como combustible de los hornos de incineración o de cementeras.

El combustible sólido recuperado resulta a partir de las corrientes de residuos municipales, residuos de demolición y construcción o residuos comerciales e industriales. Este producto se da al separar los residuos sólidos entre aprovechables (reciclables), orgánicos (húmedos) y sobrantes o restos. Este último generalmente tiene un poder calorífico suficiente para combustión, ya que contiene, entre otros materiales, papeles, textiles, cartones y plásticos, que por su deterioro no se comercializan como reciclables (ERFO, s. f.). En Europa denominan este material CSR, y es prácticamente el rechazo de las plantas de clasificación, ya sea de tratamientos mecánico biológico, plantas de clasificación de envases, plantas de separación, y compostaje. La Normativa europea define CSR como aquellos combustibles producidos a partir de residuos no peligrosos, tras su adecuado tratamiento, y que cumplen los requisitos de clasificación y especificaciones establecidas en la norma CEN/TS 15359 (Gallardo Izquierdo, Edo-Alcón, & Vargas Zúñiga, 2017).

Los combustibles derivados de residuo (CDR) corresponden a un término no definido, y se refiere a los desechos que no han sido procesados adecuadamente. Son diferentes a los CSR, ya que los CDR no están estandarizados y sus características (composición, contaminantes, valor calorífico) son indeterminadas.

Estos CSR pueden ser valorizados energéticamente en instalaciones de incineración y co-incineración (plantas cementeras), plantas industriales, incineración en hornos con recuperación de energía, gasificación, pirólisis y plasma, siendo esto una alternativa al depósito de residuos en vertedero (ERFO; CEMBREAU, 2015). Entre sus ventajas de utilización se encuentran la producción de calor o energía, la reducción del uso de fuente de energía no renovable, ahorro económico, disminución en las emisiones de gases de efecto invernadero, evita el depósito de residuos en vertedero recuperando la energía que contienen los residuos, se disminuye la utilización de coque, y por lo tanto el agotamiento de combustibles fósiles (Güereca, 2017). Es importante destacar que la transformación de residuos en CSR requiere de energía (por lo tanto, encarece los costos de producción), pero de acuerdo con la información de la Organización Europea de Combustible Recuperado - ERFO, el balance de este proceso es positivo para el generador.

Las propiedades obligatorias presentes en la Norma EN 15359 de 2012 que se le exigen a los CSR incluyen: la forma y tamaño de las partículas, el contenido de humedad, el contenido de cenizas, el valor calorífico neto, el contenido de cloro, y cada metal pesado relevante (Directiva 2000/76/CE relativa a la incineración de residuos, y Directiva 2010/75/UE), además se debe especificar la clase y el origen de CSR o SRF (por sus siglas en inglés).

De estas, las propiedades que se deben identificar siempre, aunque no en términos de límites para describir o clasificar el tipo de CSR, de acuerdo con lo planteado en *The role of SRF in a Circular Economy* (ERFO, s. f.) y *Combustibles sólidos recuperados- Especificaciones y clases* (ZKG International, 2014) son:

- El Valor Calorífico Neto (NCV, por sus siglas en Inglés): determina el rendimiento y su valor como combustible.
- Presencia de Cloro (Cl): define la condición técnica. Su presencia contribuye con la corrosión, por lo tanto, reducirá su valor de mercado.

- Presencia de mercurio (Hg): define la condición ambiental. Es el metal pesado más relevante, debido a su alta volatilidad; por lo tanto, su alta posibilidad de ser emitido.

Independiente de lo anterior, todos los metales pesados son parámetros obligados de determinación. Así lo especifica la Norma Europea EN15359. Con base en estas tres propiedades se puede establecer la calidad del CSR (ZKG International, 2014). En la Tabla 5 se pueden observar los límites establecidos con base en las propiedades de la Norma Española EN 15359 de 2012.

Tabla 5.

Sistema de clasificación de los CSR según EN 15359:2012

PARÁMETRO	BASE	UNIDAD	CLASE				
			1	2	3	4	5
PCI (valor medio)	Base húmeda	MJ/kg	≥ 25	≥ 20	≥ 15	≥ 10	≥ 3
Contenido en Cloro	Base seca	% Cl	≤ 0,2	≤ 0,6	≤ 1,0	≤ 1,6	≤ 3,0
Contenido en Hg	Base húmeda	mg/MJ	≤ 0,02	≤ 0,03	≤ 0,08	≤ 0,15	≤ 0,5
Hg, (percentil 80)		mg/MJ	≤ 0,04	≤ 0,06	≤ 0,16	≤ 0,3	≤ 1

Fuente: tomado de (Velasco & Sánchez, 2012).

De acuerdo con Yaque Sánchez & Ollero de Castro (2013), en países de Europa como Alemania, Austria, Finlandia, Italia, Holanda y Suecia, la industria cementera, principalmente, utiliza cerca de 14 millones de toneladas/año de CDR/CSR. Se espera que en el largo plazo esta cantidad esté entre 24 y 41 millones. Uno de los mercados potenciales de consumo de CDR/CSR es el de generación de energía.

5.4.2 Gasificación

Es un proceso parecido al de la incineración o combustión con aprovechamiento energético, que somete los residuos sólidos a temperaturas superiores a los 600°C, se realiza una oxidación parcial, con déficit de oxígeno (proceso difícil de implementar en operaciones a escala comercial), con el cual se evita la combustión inmediata. Se puede utilizar fundamentalmente con residuos sólidos que tengan alto contenido de carbono, por lo tanto, demanda un sistema de pretratamiento.

Durante el proceso de gasificación el residuo se descompone en gas de síntesis (syngas), escoria, ceniza o carbón vegetal. Este último producto es por el cual se conoció el proceso de gasificación en sus inicios, en el siglo XIX. El syngas está compuesto de monóxido de carbono, hidrógeno y presencia de dióxido de carbono en menor medida (CO , H_2 , CO_2), con alto poder calorífico para ser utilizado, ya sea para generar energía mediante un motor o una turbina de gas, y/o continuar mediante una ruta química como materia prima. Durante este proceso se debe contar con equipos para el control de la contaminación, debido a las emisiones generadas, la producción de escoria, cenizas volantes (las cuales se consideran tóxicas), y los vertimientos (Tangri & Wilson, 2017). En los últimos años algunas empresas en el mundo² están trabajando en la producción de combustibles líquidos como gasolina de avión, comenzando con gasificación y continuando mediante un proceso denominado Fisher-Tropsch, el cual permite utilizar el syngas generado, cuyas plantas de producción están aún en construcción.

La gasificación, así como el proceso de pirólisis, requiere un exigente control de temperatura y presión al interior del sistema, lo cual la hace aún más compleja. Estas tecnologías al igual que la combustión aprovechan el valor energético de los residuos, pero se diferencian de esta, porque aprovechan además el valor químico de los residuos (Pinasseau, Zerger, Roth, Canova, & Roudier, 2018).

De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía (Waldheim, Lars ; Waldheim Consulting, 2018) la conversión de un combustible sólido en un gas de producto crudo comprende las siguientes etapas:

- Secado de la humedad residual en el combustible
- La descomposición pirolítica del combustible en:
 - Vapor de agua adicional que emana de la descomposición,
 - Gases ligeros como CO , CO_2 , H_2 , CH_4 , hidrocarburos C_2 y C_3 ,
 - Aromáticos ligeros benceno, tolueno y xileno (BTX),

² <https://www.velocys.com/>
<https://fulcrum-bioenergy.com/>

- Hidrocarburos más pesados de naftaleno (C₁₀) y superiores, incluidos compuestos de PAH generalmente denominados alquitranes, más comúnmente en la fase de vapor a temperaturas de gasificación y
- Residuo carbonoso sólido generalmente denominado char.
- La conversión del carbón por oxidación directa con oxígeno a principalmente CO₂ o por reacción de gasificación que involucra vapor de agua y CO₂ a CO y H₂, o CO, respectivamente.
- Reacciones de fase gaseosa secundaria como el desplazamiento de gas de agua, reformado vapor / CO₂ de hidrocarburos y otras reacciones de hidrocarburos menos definidas, etc.

La mayoría de las principales reacciones de gasificación son endotérmicas. La principal excepción es la oxidación del carbón (o gases combustibles) por el oxígeno, pero también el cambio de gas de agua hacia el hidrógeno y la pirólisis en ciertas ventanas de temperatura, que también son exotérmicas. Por lo tanto, existe la necesidad de suministrar o generar energía dentro del gasificador para equilibrar la conversión general. Hay dos principios fundamentales utilizados para el suministro de energía al proceso de gasificación: gasificadores autotérmicos y alotérmicos, respectivamente (Gasification of waste for energy carriers, 2018).

El proceso de gasificación presenta muchas ventajas de carácter ambiental. Entre ellas, genera menos emisiones, tiene una diversidad de productos como calor, syngas o cenizas, reduce el volumen de los residuos y desinfecta el residuo generado (las cenizas y escorias), aunque es controvertido por diversos autores dadas sus desventajas como el alto volumen de gases y cenizas de fondo generados, su baja eficiencia térmica. y porque puede generar NO_x y compuestos orgánicos tóxicos. En el mundo existen más de 100 plantas de gasificación, principalmente en Japón (Nippon Steel & Sumikin Engineering, 2019), donde se utilizan plantas de gasificación para tratar las cenizas o escorias generadas (Mutz et al., 2017). En el Reino Unido y en otros lugares del mundo hay varias experiencias de plantas de gasificación, no todas exitosas. Algunos ejemplos de esta tecnología, tomados de Darley (s.f.), y Tangri y Wilson (2017) son:

- *Scotgen (subsidiario de Ascot Environmental), Dargavel, Escocia, Reino Unido: Entre 2009 y 2012, Scotgen operó una planta de gasificación de residuos sólidos municipales, lo que dejó en evidencia cada uno de los riesgos que se describen en este documento. En 2012, la Agencia Escocesa de Protección Ambiental revocó el permiso de funcionamiento de la instalación, lo que significó su cierre definitivo. Las razones fueron básicamente Incumplimiento constante de los requerimientos del permiso, incapacidad de mantener suministros financieros y recursos para cumplir con los requerimientos del permiso, e Incapacidad de recuperar energía de forma más eficiente.*

- *Plasco, Ottawa, Canadá: Desde 2008 a 2011, Plasco llevó a cabo un proyecto de demostración de gasificación con plasma cerca de Ottawa, en Canadá, con fondos de empresas como Soros Fund Management, entre otras. Durante estos años, la planta entregó una cantidad de información inusual sobre sus operaciones, que incluía emisiones, toneladas recibidas y toneladas procesadas. Algunos de los problemas de emisiones que fueron desclasificados incluían altos niveles de dióxido de sulfuro y otros tipos de emisiones excesivas. En el transcurso de estos tres años, los problemas en el funcionamiento se volvieron tan comunes que la instalación solo procesó residuos el 25% de los días y en aquellos días procesó un promedio de 23 toneladas diarias. Esto es aproximadamente un 7% de lo que Plasco estimaba que podría procesar (85 toneladas al día). Alrededor de 390 millones de dólares de capital social se destinaron a Plasco entre 2005 y 2015.*
- *En California, Plasco intentó construir un incinerador de gasificación de plasma en Gonzales, una comunidad predominantemente latina. El proyecto no logró obtener los permisos necesarios debido a la fuerte oposición de la comunidad, y la propuesta se estancó luego de no poder asegurar fondos estatales para energías renovables.*
- *En 2012, Plasco firmó un contrato de 180 millones de dólares por 20 años con la ciudad de Ottawa para financiar un nuevo proyecto de gasificación de plasma que prometía procesar 300 toneladas de residuos municipales al día. Durante dos años, en reiteradas ocasiones la compañía no respetó los plazos de financiamiento. En 2015, la ciudad puso fin al contrato y Plasco presentó un recurso de protección crediticia.*
- *Compact Power, Reino Unido: Esta empresa recibió una gran cobertura mediática de sus planes para construir instalaciones de gasificación y otras similares, para luego pasar a ser privada, lo que significó la pérdida de 20 millones de libras para los inversionistas. Compact Power se enfrentó a desafíos operacionales y de combustible: un informe en terreno del 2005 reveló que los costos operacionales eran demasiado altos y que el valor calorífico era demasiado bajo para que la planta fuese viable como un generador de energía.*
- *Thermoselect, Karlsruhe, Alemania: La incierta naturaleza de la tecnología de gasificación quedó demostrada con la clausura, después de un historial de operaciones problemático, de la gasificadora emblema de Europa, la planta de Thermoselect en Karlsruhe, Alemania. Los problemas operacionales incluían una baja o nula producción de electricidad en algunos años, corrosión, contaminación del agua, consumo de agua y un exceso en la emisión permitida de dioxinas, NOx, partículas en suspensión y HCl. El gobierno regional descubrió que las paredes de la cámara estaban en tan malas condiciones que algunos pedazos se habían caído y pudieron haber causado una explosión. Las instalaciones se encontraban frecuentemente cerradas debido a estos problemas y durante cinco años de funcionamiento, procesó la quinta parte de los residuos acordados. Esto resultó en costos adicionales en el cumplimiento de los contratos para el tratamiento de residuos municipales con los gobiernos locales. La generación de energía constituyó un reto: en 2002, la planta utilizó 17 millones de metros cúbicos de gas natural para calentar los residuos, y no entregó nada de electricidad o calor a la red. Finalmente, la dueña de las instalaciones de Energie Baden-Württemberg en Karlsruhe las cerró luego de perder 400 millones de euros (aproximadamente 500 millones de dólares en 2004).*

Es importante destacar que, independiente de los fracasos de las plantas anteriormente mencionadas, existen otras en la actualidad en estado piloto- industrial que buscan operar con residuos sólidos urbanos mezclados. Algunas de estos proyectos son:

- Velocys (<https://www.velocys.com/technology/>): proyecto de planta en el Reino Unido para producir combustible para avión. En este piloto también participan Shell y British Airways.
- Thermo Chem Recovery International (TRI) (<https://tri-inc.net/>): Tiene un proyecto en Nevada para el año 2022. En esta también participa las empresas Fulcrum y Abengoa, y busca producir combustible para avión a partir de residuos sólidos.

Es la inestabilidad del proceso químico para la transformación del gas sintético (Syngas), la que hace que aún no estén resueltas todas las dificultades de la gasificación y su aprovechamiento energético. De acuerdo con Tangri y Wilson (2017) en su informe *Waste Gasification & Pyrolysis: High Risk, Low Yield Processes for Waste Management*, la alta complejidad en el manejo de los gases generados en los procesos de gasificación, se da por la mezcla de residuos con diferente composición, lo que los hace un “combustible” homogéneo, por lo que esta tecnología no ha logrado su pleno desarrollo, aspecto que se demuestra en cerca de 10 proyectos con dificultades o incluso sin funcionar, descritos en los párrafos anteriores, como Air Products, Teeside, Tees Valley, UK, Plasco, Ottawa, Canada, Oneida Seven Generations Corporation, Green Bay, Wisconsin, U.S, Compact Power, UK, Thermosteel, Karlsruhe, Germany, entre otros.

Los procesos de gasificación, si bien pueden funcionar con residuos sólidos urbanos, requieren que estos residuos pasen previamente por una planta de separación, toda vez que deben ser retirados los residuos inertes como vidrios, metales y piedras o tierra, y mantener ciertas características definidas, criterio complejo cuando se habla de residuos sólidos urbanos. De acuerdo con Neuwahl (2019), las características especiales del proceso de gasificación son:

- Requiere como insumo residuos que contengan altos contenidos de Carbono, como son: papel, cartón, residuos orgánicos, residuos de jardín y plásticos.
- Producen menor volumen de gas en comparación con el proceso de combustión en la incineración (hasta un factor de 10 utilizando oxígeno puro).
- Formación predominante de CO en lugar de CO₂.

- Altas presiones operativas (en algunos procesos).
- Acumulación de residuos sólidos como escoria de alta temperatura.
- Utilización material y energética del gas de síntesis.
- Flujos de aguas residuales utilizada en la limpieza de gas de síntesis.

5.4.3 Pirólisis

Pirólisis consiste en la descomposición térmica de las sustancias orgánicas de los residuos en ausencia de oxígeno (aire), o lo suficientemente pequeñas (solo lo aportado por los residuos) como para que no se produzca combustión en extensiones significativas (Fundación para la Economía Circular, 2014). Es un proceso de descomposición térmica de las moléculas orgánicas de los residuos entre 500 y 800 °C, lo que resulta en la formación de gas de pirólisis o pirolítico, aceites, y una fracción sólida denominada coque carbonizada, lo cual dependerá de la temperatura utilizada y el tiempo de retención (Fundación para la Economía Circular, 2014). En esta misma referencia se podrá descubrir una mayor descripción del proceso de pirólisis.

Algunas características del proceso son:

- Funciona con temperaturas en el rango de 300 a 800 °C (generalmente está a 500 °C).
- La ausencia de un agente oxidante y de un gas de dilución supone que el poder calorífico inferior (PCI) del syngas sea superior al obtenido en un proceso de gasificación (10 - 20 MJ/Nm³).
- El proceso convierte menos energía química en energía térmica, en comparación con el proceso de gasificación.

De acuerdo con Neuwahl (2019), las plantas de pirólisis para el tratamiento de residuos generalmente incluyen las siguientes etapas básicas del proceso:

- Preparación y molienda: el molinillo mejora y estandariza la calidad de los residuos representados para el procesamiento, y así promueve la transferencia de calor.

- Secado (depende del proceso): un paso de secado por separado mejora el menor valor de calentamiento (LHV– lower heating value) de los gases de proceso en bruto y aumenta la eficiencia de las reacciones de gas sólido dentro del horno rotativo.
- Pirólisis de desechos, donde además del gas de pirólisis se acumula un residuo sólido que contiene carbono, y que también contiene porciones minerales y metálicas.
- Tratamiento secundario de gas de pirólisis y coque de pirólisis, a través de la condensación de los gases para la extracción de mezclas de petróleo utilizables energéticamente y/o la incineración de gas y coque para la destrucción de los ingredientes orgánicos y la utilización simultánea de energía.

Los productos obtenidos son:

- Fracción gaseosa: Gas crudo producido en el reactor de pirólisis. Este syngas contiene CO, H₂, CH₄ y se puede utilizar como combustible en cámaras de combustión.
- Fracción líquida: Cadenas de hidrocarburos como alquitranes, ceras y aceites, las cuales tienen alto poder calorífico.
- Fracción sólida: Residuos sólidos no combustibles, con un porcentaje significativo de carbón.

Pirólisis es una tecnología bastante extendida para la producción de carbón o coque (mediante pirólisis de la madera), así como en la valorización energética de llantas y de suelos contaminados. No obstante, su aplicación para el tratamiento de residuos sólidos urbanos está menos extendida, aunque se observa el desarrollo de plantas piloto y a escala industrial para la gestión de residuos sólidos, las cuales tienen como objetivo producir syngas y de allí continuar el proceso para producir etanol, metanol u otros compuestos químicos por parte de empresas como Enerkem en Canadá, Abengoa en España, entre otras.

El principal problema de la pirólisis de los residuos sólidos urbanos es la heterogeneidad de los residuos, sin embargo, algunas de las ventajas potenciales de los procesos de pirólisis por su contribución en la economía circular, se destacan en Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Incineration (Joint Research Centre, 2018), son las siguientes:

- Es posible producir metanol, mediante la recuperación del valor material del componente orgánico.

- El Singas producido puede utilizarse para generar mayor cantidad de energía eléctrica mediante motores o turbinas de gas, en vez de utilizar calderas de vapor.
- Si se produce carbón es importante lavarle el contenido de cloro para cumplir con las especificaciones para el uso externo.

En la Figura 10, se presentan los componentes generales de una planta de pirólisis.

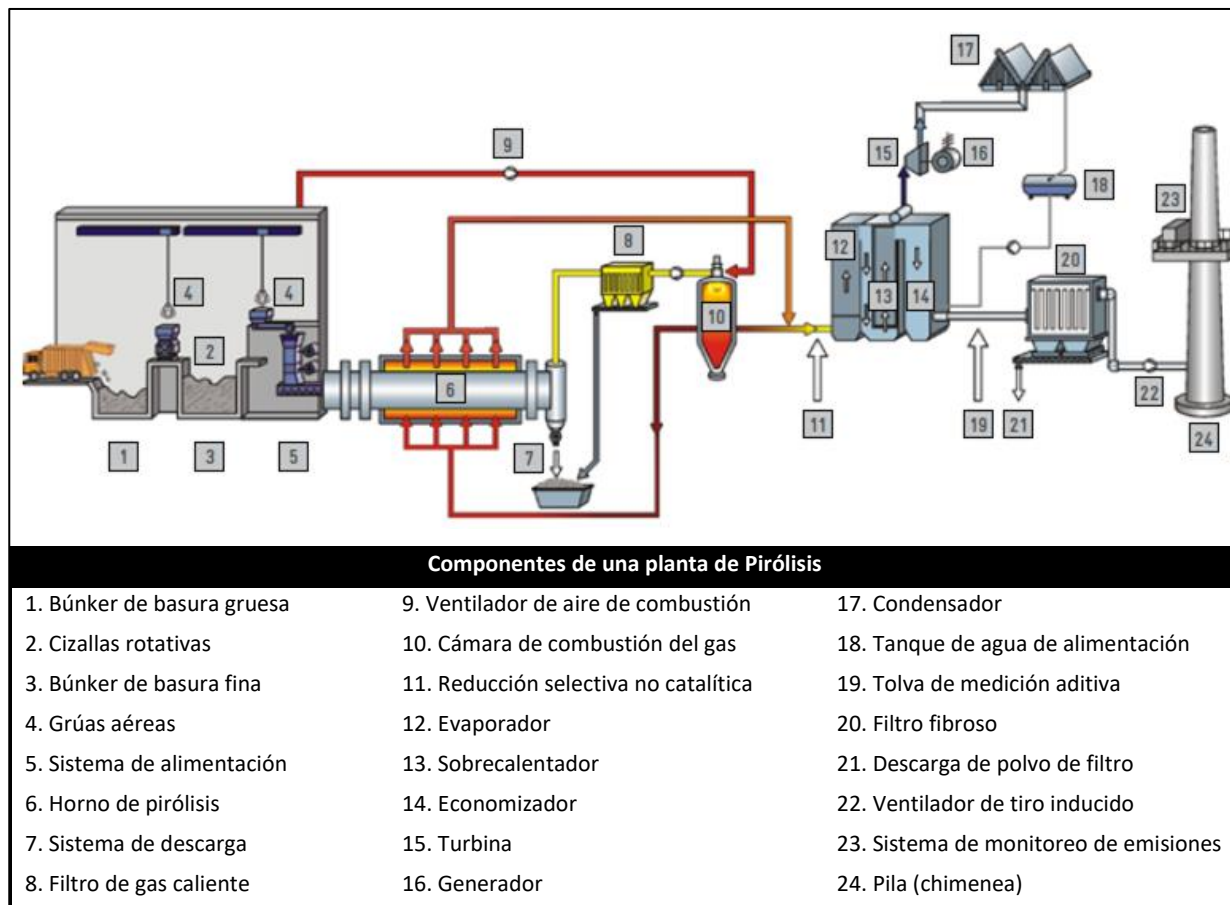


Figura 10. Componentes de una planta de Pirólisis para tratamiento de residuos sólidos. Fuente: (Mutz, Hengevoss, Hugi, & Gross, 2017) y adaptado por el autor.

De acuerdo con las diferentes referencias sobre la utilización del proceso de pirólisis en la valorización energética de residuos, se concluye que es un proceso con múltiples ventajas como: la mínima generación de emisiones, la reducción de los residuos sólidos en más de un 70% de su peso y la producción de gas y combustibles de síntesis con alto valor de mercado, utilizado fundamentalmente para residuos homogéneos, como llantas, madera, o refinación de arenas con

hidrocarburos y carbón (Furrer & Walther, 2018). De igual manera se identifican desventajas importantes como: altos requerimientos de energía para su funcionamiento, y complicaciones para el manejo de alquitranes que causan bloqueos o taponamientos de los sistemas (Department for Environment, Food & Rural Affairs, 2013). En la actualidad no existen plantas industriales funcionando con rendimientos técnicos, ambientales y económicos adecuados en el manejo de residuos sólidos urbanos (salvo algunos materiales como llantas), por el contrario, existe un buen número de casos fallidos en el mundo al aplicar esta tecnología.

5.4.4 Biodigestión

El tratamiento de los residuos orgánicos puede realizarse en presencia o ausencia de oxígeno, así como en sistemas cerrados o abiertos. Todo depende de la disponibilidad de espacio, así como del interés que se tenga en generar energía antes de obtener un producto para utilizar como mejorador de suelo o como abono, o el de reducir el volumen de los residuos orgánicos antes de su disposición final.

En la Tabla 6. se presenta una descripción básica de los sistemas de tratamiento biológico de los residuos orgánicos de acuerdo con Best available techniques (BAT) waste treatment industries emissions (Pinasseau et al., 2018).

Tabla 6.

Tratamiento biológico de los residuos.

TRATAMIENTO BIOLÓGICO	DESCRIPCIÓN BREVE
Tratamiento aeróbico (incluye el compostaje)	Descomposición biológica del contenido orgánico de los residuos. Aplica para los residuos sólidos, las aguas residuales, biorremediación para lodos y suelos contaminados con combustibles. El compostaje consiste en la construcción de pilas de residuos (hileras) para producir la biodegradación aeróbica de los sólidos orgánicos, produciendo una sustancia húmica valiosa como acondicionar de suelos o constituyente de los medios de cultivo.
Tratamiento anaeróbico (o digestión anaeróbica - AD)	Descomposición del contenido orgánico de desechos en sistemas cerrados en ausencia de oxígeno y producción de digestado valioso como un fertilizante orgánico o mejorador de suelos. Se basa en la biocenosis, usando fundamentalmente dos formas de bacterias: formadoras de Acido y Metano. Aplicado a desechos sólidos líquidos, a la biorremediación de aguas residuales altamente contaminadas y a la producción de biogás para ser utilizado como combustible.
Tratamiento mecánico biológico (MBT)	Tratamiento de residuos sólidos mixtos que combina el tratamiento mecánico (por ejemplo, trituración) con el tratamiento biológico, como el tratamiento aeróbico o anaeróbico.
Bio-secado	Un reactor típico de bio deshidratación, incluye una serie de recipientes discretos y cerrados junto con un sistema de aireación o una gran sala de biodeshidratación donde los lotes de desechos se mueven progresivamente a través de la sala mediante una grúa de carga mecánica (montón errante).
Lodos activados	Descomposición de desechos orgánicos en el agua exponiéndolos al crecimiento biológico. El agua se recicla y airea para facilitar la acción biológica y se genera un lodo. Dos sistemas comúnmente aplicados: sistemas de crecimiento suspendidos y sistemas de crecimiento adjuntos.
Lagunas de aireación	Grandes lagunas que contienen altas concentraciones de microorganismos. La laguna está aireada para fomentar el crecimiento bacteriano y la descomposición de los desechos.

Fuente: (Pinasseau, Zerger, Roth, Canova, & Roudier, 2018)

En el presente trabajo de investigación se hace énfasis en la digestión anaerobia, toda vez que esta permite generar energía en su proceso de descomposición, y de esta manera podrá ser comparable con las otras alternativas de valorización de residuos. Por ello, no se desconoce el compostaje, a pesar de que esta tecnología no se analiza en el presente trabajo, como una de las alternativas de tratamiento de residuos orgánicos más utilizada, el cual requiere de tiempo y

espacio para su desarrollo. Además, el producto de la biodigestión generalmente se debe compostar para lograr el secado del residuo y generar un producto útil.

Digestión Anaerobia (DA), de acuerdo con Mutz et al. (2017), la DA es la descomposición de la materia orgánica a través de microorganismos en ausencia de oxígeno libre. La DA se produce naturalmente en condiciones privadas de oxígeno, como algunos sedimentos lacustres. En condiciones controladas este tipo de tratamiento puede producir biogás. Generalmente este proceso utiliza un reactor hermético, en el cual se generan los gases. El llamado digestor anaerobio proporciona condiciones favorables para que los microorganismos conviertan la materia orgánica (materia prima de entrada) en biogás y digestato, el cual es un residuo sólido-líquido que se puede usar como fertilizante orgánico o se composta, siempre y cuando la materia prima provenga de una fuente separada desde el origen, asegurando que el residuo orgánico no esté contaminado.

El biogás es una mezcla de diferentes gases que se pueden convertir en energía térmica y/o eléctrica, ya que su principal componente es el gas metano inflamable (CH_4), portador de energía en el biogás, cuyo contenido oscila entre el 50 y el 75%, según la materia prima y las condiciones operativas. El biogás contiene además CO_2 , H_2 , H_2S , entre otros gases. El valor calorífico del biogás es $6,4 \text{ kWh} / \text{m}^3$. (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía - IDAE , 2007).

La digestión anaeróbica también se usa en la industria para manejar desechos con un alto contenido de DQO, por ejemplo, en el tratamiento de porquinaza o los lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales.

Según diferentes referencias, como (Pinasseau, Zerger, Roth, Canova, & Roudier, 2018), (Pascual , Begoña, Gómez, Flotats, & Fernández, 2011), entre otros, para una adecuada DA es necesario realizar el siguiente procedimiento:

- Fuente del residuo: El sistema genera un mejor producto final cuando los residuos orgánicos son separados en fuente, toda vez que de esta manera el digestato (producto de la DA) se podrá utilizar como fertilizante líquido o producir compost para abonos. Otros residuos permitidos son los residuos de zonas verdes (rocería, hojas, chipiado de poda o tala de árboles), lodos de plantas de depuración de aguas residuales, entre otros.

- Pretratamiento: Consiste en separar los objetos voluminosos y algunos residuos contaminantes, como metales férricos o no férricos, vidrio, entre otros.
- Trituración del material: Corresponde a reducir el tamaño del residuo hasta 5 cm aproximadamente.

De acuerdo con lo planteado en *Best Available Techniques (BAT) Waste treatment Industrial Emissions* (Pinasseau et al., 2018) se pueden distinguir las siguiente cuatro fases en la DA:

- Hidrólisis: Los componentes poliméricos de la materia prima como carbohidratos, proteínas, grasas, se descomponen en compuestos orgánicos de bajo peso molecular (entre otros aminoácidos, azúcar y ácidos grasos). Durante la hidrólisis se forma algo de hidrógeno que puede usarse directamente para la formación de metano.
- Acidogénesis: Este es un proceso de fermentación que degrada los productos intermedios, mediante bacterias ácido génicas a ácidos grasos volátiles (por ejemplo, ácidos acéticos, ácido propiónico y butírico), así como a dióxido de carbono e hidrógeno. El ácido láctico y los alcoholes se producen en pequeñas cantidades.
- Acetogénesis: Los materiales restantes se transforman mediante bacterias acetogénicas, en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono.
- Metanogénesis: Esta es la última fase, en la cual se produce metano y dióxido de carbono.

Los productos finales de la DA son el biogás, que tiene un alto contenido energético ($\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{S}$) y el digestato o bioabono, compuesto por material orgánico procesado. Es importante destacar que la cantidad generada de digestato equivale aproximadamente a la cantidad de residuo orgánico introducido en la DA, por esta razón es que dicho producto debe continuar su tratamiento, para disminuir su volumen y tener otras formas de uso.

En resumen, se puede decir que la DA es mayormente un proceso que se utiliza para producir biogás y energía que para disminuir la cantidad de residuos a disponer en un relleno sanitario. En la Figura 11 se puede observar el camino a la digestión anaerobia como lo plantea Pinasseau, y en la Figura 12, un ejemplo de la DA.

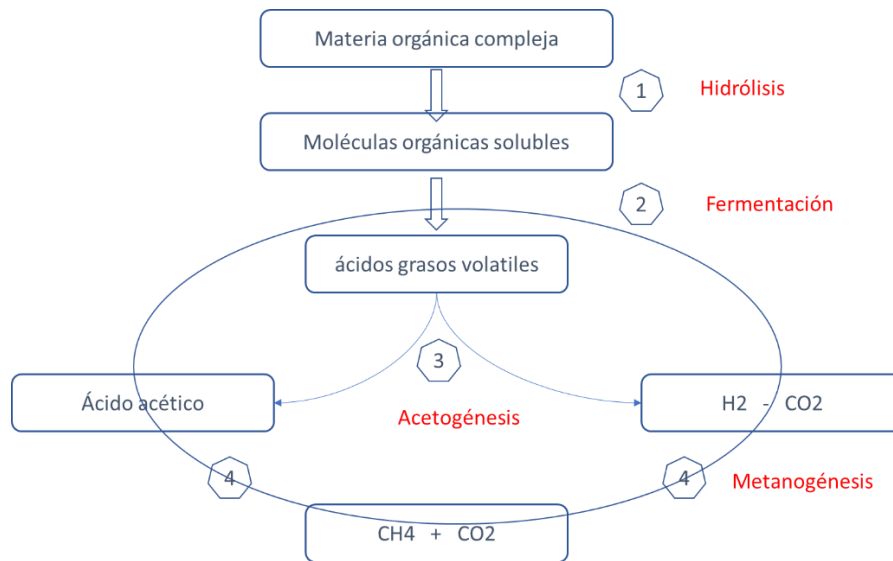


Figura 11. Camino de la digestión anaeróbica. Fuente: (Pinasseau, Zerger, Roth, Canova, & Roudier, 2018) y adaptada por el autor.

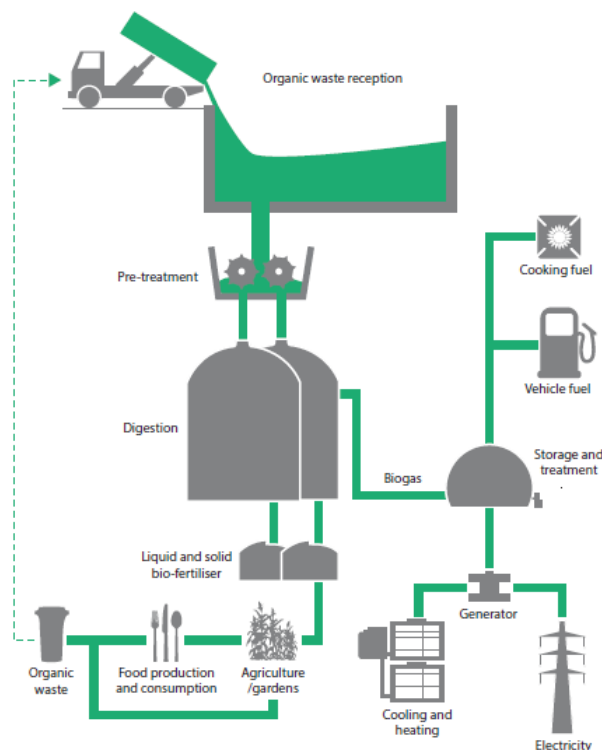


Figura 12. Esquema de generación de fertilizantes y energía con residuos orgánicos en DA. Fuente: (Kaza & Bhada-Tata, Decision Maker's Guides for Solid Waste Management Technologies, 2018).

Respecto al digestato, se puede buscar separar el líquido del sólido o mediante el proceso de secado eliminar el agua contenida, de tal manera que el sólido pueda ser compostado para luego

ser utilizado el producto (compost), como mejorador de suelos o abono según su procedencia, incluso en una planta de valorización como combustible sólido recuperado. El problema de esta acción radica en que se incrementan los costos de manejo de este material, tanto por necesidades de área para el secado, como por la implementación de equipos para el secado.

De acuerdo con (Acodal - Área Metropolitana del Valle de Aburra, 2013) y (Román, martinez, & Pantoja, 2013), entre otras referencias, se define que el compost se produce en un periodo comprendido entre 4 y 8 semanas, dependiendo fundamentalmente del tipo de residuo, de las cantidades, del proceso y de las características de material que se pretende gestionar y utilizar o comercializar. Los pasos principales que se llevan a cabo en el compostaje tienen que ver con:

- Recepción: Se deben pesar y monitorear.
- Preparación: Separación manual, trituración y separación mecánica.
- Descomposición: mesófila – termófila – mesófila II enfriamiento.
- Maduración: reacciones secundarias de condensación y polimerización de compuestos carbonados.
- Finalización: Tamizaje y separación de impurezas.

En el documento de Patrick y Roger (Estudio de factibilidad de una planta WtE para la Región Metropolitana de Chile, 2018) se pueden observar tamaños típicos de estas plantas y sus costos de inversión.

5.4.5 Rellenos sanitarios

La disposición final de los residuos en rellenos sanitarios ha sido el método más aceptado y utilizado en el mundo, por sus costos de inversión y operación, así como por las características ambientales de dicho proceso. Adicionalmente, para ciudades que tienen grandes avances en reciclaje y en tratamiento de residuos, se requiere un sitio para disponer los rechazos, para lo cual se utiliza este tipo de disposición.

Un relleno sanitario es una solución técnica de Saneamiento Básico, resultado de procesos de planeación, diseño, operación y control para la disposición final adecuada de residuos sólidos, es

una instalación física utilizada para disponer en su suelo los residuos sólidos de rechazo producidos en una comunidad que luego son compactados y cubiertos con una capa de suelo al finalizar cada día de operación (Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, 1994). La gestión de un relleno sanitario implica la planificación, el diseño, la explotación, el manejo de los impactos ambientales, el cierre, la clausura, post clausura y el abandono, todo esto buscando minimizar los impactos ambientales y de salud pública.

Estos sitios deben tener una supervisión permanente en la operación, mediante monitoreo, seguimiento y control técnico, por lo tanto y ere otras actividades, en un relleno sanitario se realiza colocación de los residuos, se monitorea la capacidad diaria utilizada y la remanente en m³, los residuos dispuestos se compactan diariamente y se mide el nivel de compactación, se realiza cobertura diaria y se controla su nivel de compactación (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017). Adicionalmente a estas actividades diarias se debe realizar monitoreo de los posibles contaminantes por lo tanto se deben implantar sistemas para el control y tratamiento de los lixiviados, el biogás o el material particulado (Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, 1994).

En Colombia, el componente de disposición final está incluido en la normatividad para la gestión integral de residuos sólidos. Entre estas normas las más importantes son:

- Reglamento de Acueducto y Saneamiento – RAS (Título F – 2010, Resolución 0330 - 2017).
- Decreto 1077 de 2015 (recoge el Decreto 838 de 2005).
- Resolución 720 de 2015.
- Decreto 1784 de 2017.
- Resolución 938 de 2019.

Estas normas definen las condiciones tecnológicas, técnicas, ambientales y regulatorias para la implementación de la opción de disposición final de residuos sólidos en rellenos sanitarios. Entre otras definiciones para esta tecnología se encuentran: “El relleno sanitario es la solución técnica de Saneamiento Básico, resultado de procesos de Planeación, Diseño, Operación y Control para la disposición final adecuada de residuos sólidos” (Decreto 1784 de 2017). De igual manera, el Decreto 838 de 2005 dice que el relleno sanitario es el:

Lugar técnicamente seleccionado, diseñado y operado para la disposición final controlada de residuos sólidos, sin causar peligro, daño o riesgo a la salud pública, minimizando y controlando los impactos ambientales y utilizando principios de ingeniería, para la confinación y aislamiento de los residuos sólidos en un área mínima, con compactación de residuos, cobertura diaria de los mismos, control de gases y lixiviados, y cobertura final.

En la Figura 13 se observan las estructuras básicas de un relleno sanitario.

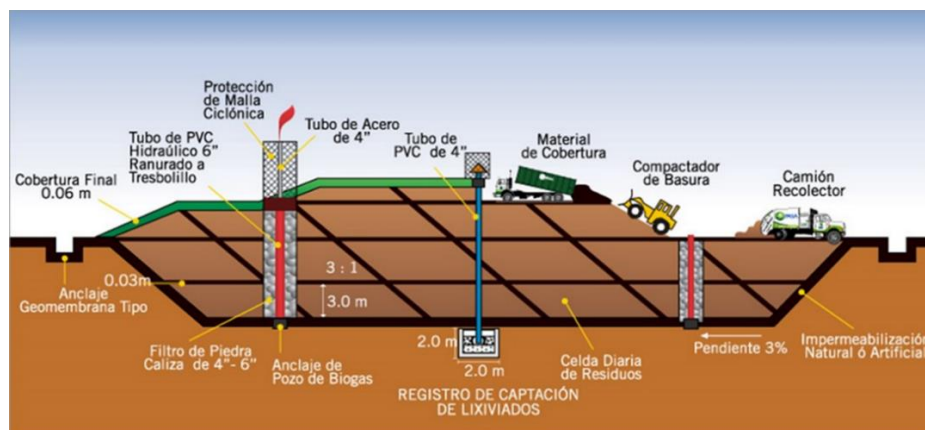


Figura 13. Disposición final en relleno sanitario. Fuente: <https://ambientalblog2010.wordpress.com/2010/12/07/los-rellenos-sanitarios/>

El Área Metropolitana del Valle de Aburrá tiene un único sitio para disponer sus residuos, este es el relleno sanitario La Pradera, ubicado a 57 km al norte de Medellín, en el Municipio de Donmatías. Este predio de 382 Ha, que funciona desde 2003, recibió en el 2019 más de 1.177 mil toneladas, procedentes de más 38 municipios de Antioquia. En la Foto 2 se puede observar un aspecto general del relleno sanitario La Pradera.



Foto 2. Aspecto del Vaso Altair en el relleno sanitario la Pradera. Fuente: Archivo del autor.

Desde 2003, cuando inició operaciones el relleno sanitario La Pradera, se han construido tres vasos para recibir y disponer los residuos generados en el Valle de Aburrá. Estos vasos son: Carrilera, La Música y Altaír. En la actualidad está en proceso de licenciamiento el vaso La Piñuela, y para el mediano plazo se cuenta con el vaso Cumbres (Cumbres I y II). Entre 2003 y 2019 se han depositado, en promedio, 13 millones de toneladas de residuos provenientes de los 10 municipios del Valle de Aburrá y otros 20 municipios de Antioquia. La cantidad de residuos dispuestos año por año en estos vasos se presenta en la Tabla 7 y el Gráfico 1.

Tabla 7.

Residuos dispuestos en el relleno sanitario La Pradera.

TOTAL TONELADAS DISPUESTAS EN PRADERA 2003 - 2019													
Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total
2003	-	-	-	-	-	-	27.614	41.309	39.576	46.964	48.055	56.806	260.324
2004	50.826	48.106	48.799	37.971	45.331	42.863	45.121	54.794	55.036	56.030	59.338	63.568	607.784
2005	57.649	52.693	57.578	57.753	60.405	59.238	57.036	59.033	56.577	60.048	61.678	64.872	704.562
2006	59.664	54.791	60.184	57.258	62.092	57.522	56.372	59.072	56.769	57.373	58.951	63.097	703.147
2007	61.692	53.535	59.340	54.001	61.548	54.991	53.870	56.331	53.008	58.823	58.909	59.933	685.980
2008	59.741	52.493	53.556	55.204	57.558	53.888	57.076	54.652	56.128	56.691	49.025	58.021	664.033
2009	50.570	41.822	46.321	46.278	51.602	48.604	50.475	49.575	48.473	48.682	50.298	58.475	591.174
2010	51.160	47.131	50.485	47.871	51.822	51.278	53.848	53.241	53.000	52.797	59.125	69.026	640.782
2011	54.924	50.991	56.127	55.891	50.984	52.077	50.412	52.996	49.999	55.768	54.611	62.964	647.743
2012	55.548	48.851	53.236	54.470	61.336	55.818	54.493	56.864	52.030	57.589	58.242	61.894	670.371
2013	59.454	50.452	54.521	55.188	58.967	55.567	59.109	54.450	58.902	63.881	65.660	68.359	704.509
2014	65.941	55.317	58.403	62.157	66.684	64.498	66.107	68.716	70.152	72.058	68.525	77.929	796.489
2015	70.273	62.927	68.486	70.674	72.275	71.198	77.059	74.546	74.246	83.883	86.812	95.375	907.754
2016	86.459	81.971	86.464	87.677	91.823	88.667	88.672	92.452	90.309	91.066	94.086	101.318	1.080.965
2017	92.988	83.987	95.925	90.039	99.007	94.550	93.435	97.287	95.075	94.834	96.266	100.242	1.133.634
2018	96.884	85.045	91.516	90.297	99.230	93.364	95.155	95.681	92.437	100.504	98.785	101.314	1.140.212
2019	99.225	88.478	97.313	96.682	103.236	94.553	100.688	97.094	93.188	101.130	100.316	105.677	1.177.581

Fuente: Información suministrada por Emvarias y ajustada por el autor.

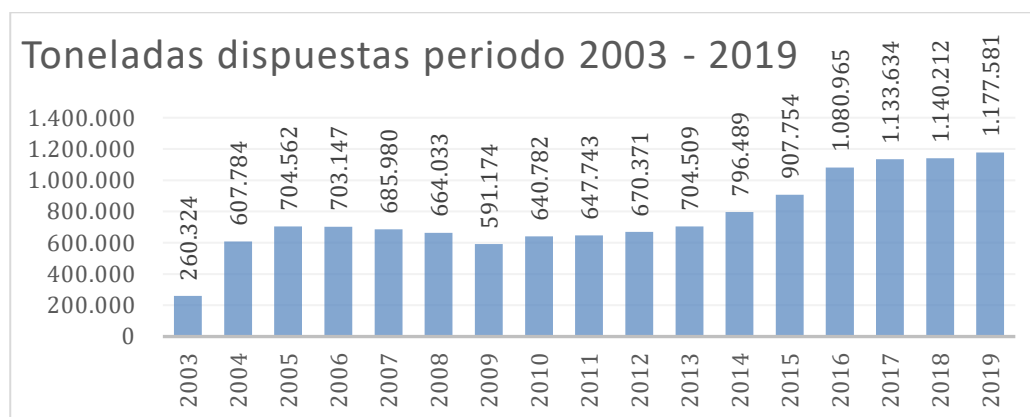


Gráfico 1. Residuos dispuestos en el relleno sanitario la Pradera. Fuente: Información suministrada por Emvarias y ajustada por el autor.

Para explicar la cantidad de residuos que se han depositado anualmente en el relleno sanitario, se debe tener en cuenta que entre los años 2006 y 2014 funcionó el Parque Industrial del Sur, o Relleno Sanitario El Guacal, ubicado en el municipio de Heliconia. Por esa razón, y como se observa en el Gráfico 1, hay tendencia a la baja en la disposición de residuos en La Pradera durante ese periodo de tiempo. A partir de 2015 se observa un crecimiento del 41%, con variaciones muy fuertes por año.

La disposición final en un relleno sanitario genera impactos, desde la construcción, durante la operación y en la clausura. Estos impactos se dan en el paisaje, el suelo, las aguas subterráneas y superficiales, el aire y el entorno, los cuales deben ser evitados, gestionados y mitigados cuando se generan por un plan de manejo ambiental. Algunos de estos impactos son:

- Intervención del paisaje natural.
- Desplazamiento de especies de fauna y flora.
- Transformación de suelo.
- Generación de lixiviados y posible ingreso de este al suelo y las fuentes naturales.
- Generación de biogás, material particulado y olores.
- Cambio de actividades en los alrededores de un relleno sanitario.

En la lista anterior se observan los impactos que comúnmente se presentan durante la construcción y operación de un relleno sanitario. Una gran diferencia entre un sistema de valorización energética y un relleno sanitario es que en el segundo los residuos perduran por cientos de años, mientras que en el primero no. Es importante ratificar que el depósito en relleno sanitario si bien funciona como un digestor, por el proceso de descomposición de los residuos orgánicos que allí se genera, no es un tratamiento; se asemeja más a un sistema de almacenamiento, toda vez que la mayoría de los residuos permanecen por cientos de años.

Es importante destacar que la producción de biogas en un relleno sanitario, el cual depende de la cantidad de residuos dispuestos y particularmente por la presencia de orgánicos, es un gas efecto invernadero, por lo tanto, debe ser mitigado para evitar la contaminación. Por las características energéticas del biogás, su captura y tratamiento permiten su utilización, ya sea en la producción de energía eléctrica como en la inyección a las redes de gas como biometano.

Un relleno sanitario se debe construir de tal forma que, primero, evite la contaminación; y segundo, que mitigue estos impactos. Algunos de los sistemas que buscan evitar y mitigar la contaminación se presentan en la Foto 3, y se listan a continuación:

- Impermeabilización del suelo.
- Construcción de cunetas para desvío y recolección de aguas lluvias.
- Construcción de sistemas internos para la recolección de lixiviados y gases.
- Construcción de planta de tratamiento de lixiviados.
- Adecuación de sistemas de extracción forzada y quema de biogás (destrucción de CH_4 para emitir CO_2).
- Sistemas de control de vectores.
- Cobertura temporal y definitiva de los residuos dispuestos.
- Compactación de los residuos dispuestos.
- Cerramiento del sitio y evitar la presencia de recicladores en la zona de depósito.
- Entre otras.

Foto 3. Componentes de tratamiento de un relleno sanitario.



Impermeabilización del suelo. Fuente: archivo del autor



Cunetas para el desvío de aguas lluvias. Fuente: archivo del autor



Colector para aguas subterráneas. Fuente: archivo del autor

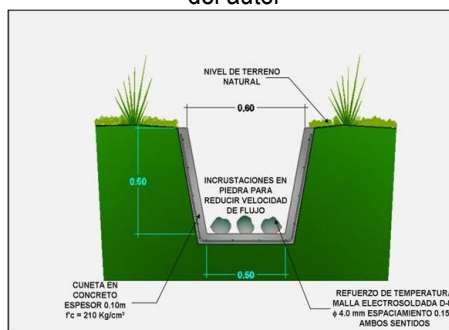
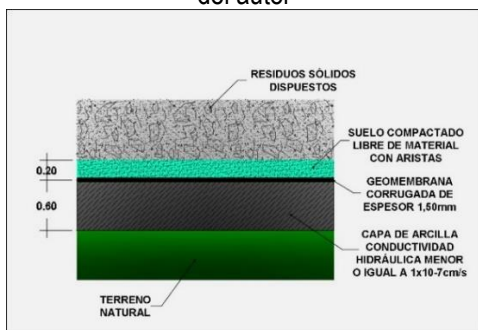


Sistema para recolección de lixiviados. Fuente: archivo del autor



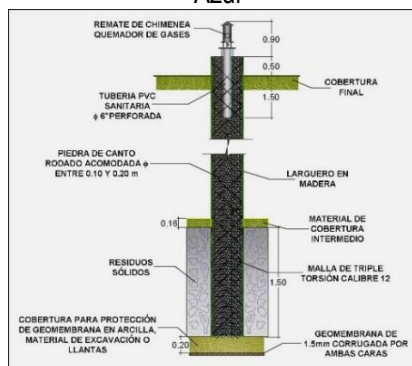
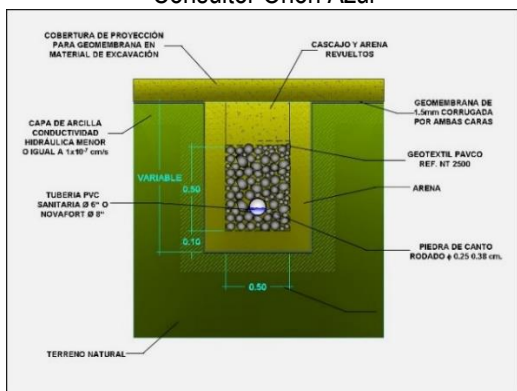
Sistema para el manejo del biogás. Fuente: archivo del autor

Planta de tratamiento de lixiviados. Fuente: archivo del autor



Impermeabilización del terreno. Fuente: Diseño del relleno sanitario del municipio de Ceja, Antioquia. Consultor Orión Azul

Canal perimetral. Fuente: Diseño del relleno sanitario del municipio de la Ceja, Antioquia. Consultor Orión Azul



Detalle del sistema de recolección de lixiviados. Fuente: Diseño del relleno sanitario del municipio de la Ceja, Antioquia. Consultor Orión Azul

Detalle del sistema de recolección de gases. Fuente: Diseño del relleno sanitario del municipio de la Ceja, Antioquia. Consultor Orión Azul

5.4.6 Comentarios generales sobre las alternativas de valorización energética de residuos

Para visualizar mejor las diferentes opciones de valorización energética de residuos y comprender sus similitudes y diferencias, se presenta en la Tabla 8 un resumen de las alternativas presentadas en los numerales 5.4.1, 5.4.2, 5.4.3 y 5.4.4, además de la DA, se habla también del

compostaje, por ser una de las alternativas más utilizadas en Colombia para el tratamiento de los residuos orgánicos. El compostaje es a su vez el tratamiento más utilizado para procesar el digestato generado en la DA (Pascual , Begoña, Gómez, Flotats, & Fernández, 2011). Con este proceso se disminuye el volumen del digestato y se genera un producto denominado compost listo para ser utilizado como abono en cultivos o mejorador suelos, de acuerdo con el origen del residuo, si este es separado en la fuente o no. En resumen, la Tabla 8 presenta información sobre:

- Temperatura del proceso.
- Materia prima que utiliza (tipo de residuos).
- Reducción de volumen.
- Requerimientos para el control de las emisiones.
- Referentes de costos por tonelada, escala de la planta y grado de uso en el mundo.

Es importante destacar que en la Tabla 8 no se considera la disposición final en relleno sanitario por no ser este un tratamiento comparable respecto a la valorización energética de residuos, independiente de la opción de aprovechar el biogás generado por la descomposición de los residuos en su interior.

Tabla 8.

Descripción de tecnologías valorización energética de residuos (WtE)

TIPO DE TECNOLOGÍA	INCINERACIÓN CON RECUPERACIÓN DE ENERGÍA	GASIFICACIÓN	PIRÓLISIS	COMPOSTAJE	DIGESTIÓN ANAEROBIA
DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA	Combustión directa de los residuos entre 750 y 1000°C, en presencia de oxígeno.	Oxidación parcial de residuos entre 800 y 1200°C en presencia de una cantidad controlada de oxígeno.	Degradación térmica del residuo entre 300 y 1300 °C en ausencia de oxígeno.	Bioconversión aeróbica de los residuos orgánicos.	Biodegradación de residuos orgánicos (fácilmente degradables) en ausencia de oxígeno, con microorganismos anaeróbicos.
PRINCIPALES PRODUCTOS	Vapor para electricidad y/o generación de calor en una caldera o turbina de vapor. Puede generar calor o electricidad o combinación de calor y energía.	Produce gas sintético para una mayor combustión o conversión a materia prima química.	Produce combustible líquido para mayor combustión o conversión a materia prima química.	Produce abono que puede servir como acondicionador de suelo, mitigar la erosión, secuestrar carbón en el suelo y ser utilizado en la recuperación de tierras y como cobertura final en rellenos sanitarios.	Produce biogás y digestato. El digestato puede descomponerse y usarse como acondicionador del suelo o deshidratarse y usarse como combustible derivado de residuos de bajo valor calorífico.
ENTRADA DE RESIDUOS	Mezcla de residuos sólidos municipales (RSM) o combustible derivado de residuos.	Solo adecuado para corrientes de residuos relativamente homogéneas, como residuos de madera, residuos agrícolas, lodos de depuradora y residuos plásticos.		Fracción orgánica separada de los RSM, restos de alimentos u otros residuos sólidos orgánicos. Adecuado para tratar material alto en lignina.	Fracción orgánica separada de los RSM, restos de alimentos, excretas de animales y humanos o líquidos y lodos. Menos adecuado para tratar material alto en lignina (maderas).
REDUCCIÓN DE VOLUMEN *	75-90%	75-90%	50-90%	60-80%**	45-50%
REQUERIMIENTOS PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN	Alto	Medio	Medio	Bajo	Medio - bajo

TIPO DE TECNOLOGÍA	INCINERACIÓN CON RECUPERACIÓN DE ENERGÍA	GASIFICACIÓN	PIRÓLISIS	COMPOSTAJE	DIGESTIÓN ANAEROBIA
COSTO POR TONELADA (US\$/TON)	95-190. Para instalaciones centralizadas a una escala moderadamente grande.	95-190. Para instalaciones centralizadas a una escala moderadamente grande.	95-190. Para instalaciones centralizadas a una escala moderadamente grande.	0-70 Para pequeña escala de compostaje. En un proyecto piloto que se ejecuta en Camboya, por ejemplo, el costo se puede compensar por el valor del producto final.	65-120 Para instalaciones centralizadas a una escala modernamente grande. Los costos dependen de los subsidios para la energía renovable.
ESCALA DE LA PLANTA	Disponible desde pequeña a gran escala. Una planta centralizada a gran escala es más común.	Disponible desde pequeña a gran escala.	Disponible desde pequeña a gran escala.	disponible a escala doméstica (compostaje doméstico), escala comunitaria (patio trasero, vermicompostaje), o en una escala centralizada grande (pila estática aireada en ventana, en vasija).	Disponibles en digestores descentralizados a pequeña escala (incluso en la granja), y digestores de gran escala para fracción orgánica de los RSM.
GRADO DE USO	Ampliamente aplicada en Europa, Japón y EEUU, incrementando su aplicación en países desarrollados.	No aplicada ampliamente y solo aplicada a pequeña escala. Plantas de gasificación comercial están establecidas en Japón y la República de Corea por 20 años con pretratamiento de los residuos a la entrada.	No establecida ampliamente para RSM.	Extendida en países de altos ingresos, Asia tiene una larga tradición de hacer y usar compost.	Uso generalizado para no RSU y uso creciente para orgánicos limpios de RSU separados de la recolección, incluido el uso de digestión anaeróbica seguida de compostaje.
APLICABILIDAD GENERAL	Apto para mezcla de RSM pero la calidad del residuos y composición en países desarrollados no pueden ser adecuados sin un tratamiento previo específico como secado previo. Un sistema de calefacción urbana no es común en países de ingresos bajos.	Potencial para la tecnología de gasificación de biomasa..	Todavía no se ha establecido en países desarrollados o en desarrollo.	Alto potencial, particularmente en países en desarrollo con una alta fracción orgánica en RSU. Todavía no se ha generalizado debido al costo operativo y la necesidad de separación en la fuente. Los impactos ambientales severos, como las emisiones de metano, el olor, el lixiviado, los bioaerosoles, el material particulado, etc., deben evaluarse y mantenerse bajo control tecnológico durante la operación.	Los digestores anaeróbicos a pequeña escala se utilizan para satisfacer las necesidades de calefacción y cocina de las comunidades rurales individuales.

Fuente: Tomado de (United Nations Environment Programme, 2019), Tecnologías actuales de WtE (página 17) y adaptado por el autor.

** Valor ajustado por el autor y tomado de diversas experiencias

Las diferencias expresadas en la Tabla 8 plantean, entre otras cosas, que para tomar decisiones respecto a la utilización de una u otra tecnología, es prioritario revisar el balance total de masa y energía que ella maneja, la cantidad de residuos gestionados, el número de plantas existentes con esa tecnología, la experiencia acumulada en diversas regiones, entre otras condiciones o características.

El aire en el proceso de valorización de residuos tiene que ver con la eficiencia en la combustión, así como en el producto que se quiere obtener. Para el caso de la incineración con aprovechamiento energético, se determina que existe una combustión completa y el producto es $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$, mientras que en una reacción de pirólisis o gasificación se puede obtener un Syngas (gas de síntesis) que contiene $\text{CO} + \text{H}_2 + \text{CH}_4$, los cuales pueden utilizarse posteriormente para producir combustibles líquidos o compuestos químicos.

Esta diferencia de la presencia de aire entre las tecnologías de valorización energética de los residuos se representa en la Figura 14.

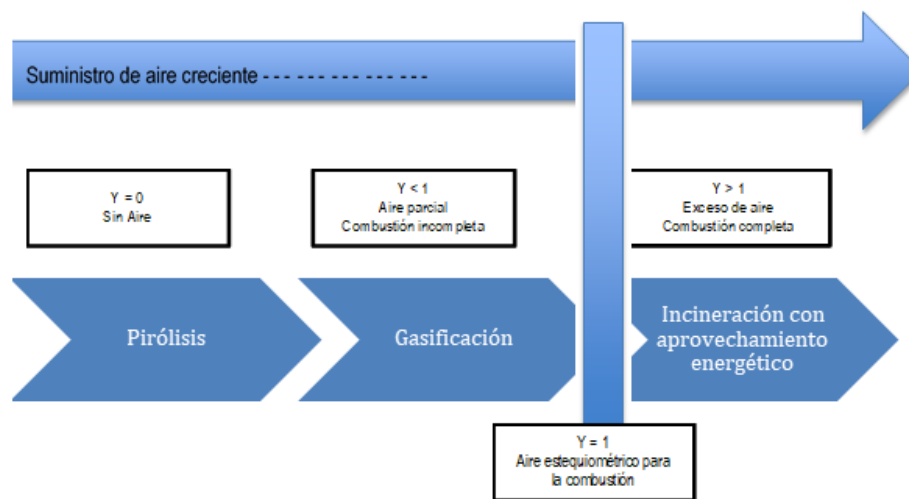


Figura 14. Resumen de la relación entre varias clases de rutas de conversión térmica. Fuente: Figura tomada de Qualification of Alternative Systems for the Thermal Conversion of Municipal Solid Waste, elaborada por (Lamers, 2017) y modificada por el autor.

De acuerdo con Lamers, Fleck, Pelloni, y Kamuk (2013) las condiciones de funcionamiento de las plantas de WtE son bastante diferentes por región, lo que se exige en una región puede no exigirse en otra (ver Tabla 9): necesidades de suministro de calor o electricidad para la comunidad,

límites de emisión, poder calorífico exigido, tratamiento de cenizas, por CAPEX y por el monto de tarifas, entre otras razones.

Tabla 9.

Requerimientos para la selección de plantas de WtE en el mundo.

CONDICIONES	EUROPA	ESTADOS UNIDOS	JAPÓN	CHINA - COREA DEL SUR
Límites de emisión	Directiva de emisiones	Comparables o algo menos estrictos que en Europa	Estrictos y comparables a Europa	Pragmáticos
Poder calorífico del SRF (Solid Recupered Fuel – siglas en inglés)	8-12 MJ / kg	7-10 MJ / kg		4 - 7 MJ / kg
Tamaño de instalación	150 mil Ton/año - 1,5 millones Ton/año	150 mil Ton/año hasta 1,0 millón Ton/año	< 100.000 Ton/año (enfoque local)	Varían
Disponibilidad	> 7,500 horas / año		6.500 - 7.500 horas/año	
Generación de calor y electricidad	Ambas	Maximización del suministro de electricidad a la red	Ambas	
Tratamiento de cenizas	No hay requisitos	No hay requisitos	Requisitos estrictos (vitrificación)	No hay requisitos
Tarifa para la conversión de residuos	Entre 25 y 100 Euro/Ton	USD\$20 - USD\$40/Ton	Hasta 300 Euros/Ton	Tarifas bajas
CAPEX	400 EUR - 1000 EUR/ Ton-año	USD\$300 - USD\$900/Ton-año	Mayores a los europeos por ser de menor escala y por la gestión de cenizas	80 EUR - 200 EUR / Ton-año

Fuente: (Lamers, Fleck, Pelloni, & Kamuk, 2013) adaptada por el autor.

De la Tabla 9 se pueden observar diferencias en CAPEX, tratamientos, y exigencias ambientales, etc., entre las regiones expuestas. Algunos aspectos que lo explican se detallan a continuación:

- En Japón se exige el uso de tecnologías alternativas para el tratamiento de las cenizas, como la vitrificación y posterior utilización en vías o fabricación de mobiliario urbano, mientras en

otras regiones solo se busca su disposición en celdas de seguridad. Un argumento válido es la falta de terrenos disponibles en Japón.

- La eficiencia energética no es la razón por la cual se tratan los residuos en Japón. Lo que se busca principalmente es la disminución de volumen del residuo a disponer. En Europa se busca aprovechar la energía, tanto térmica como eléctrica, que se produce con la combustión de los residuos.
- El precio del tratamiento en Japón es significativamente más alto que en otros lugares, básicamente por dos razones: son plantas de menor tamaño (plantas por ciudad) y por las exigencias en el tratamiento de las cenizas.

Analizando la Tabla 9, se puede argumentar que las tecnologías de valorización energética de residuos, respecto de la disposición final en relleno sanitario, requieren de un mayor CAPEX, pero son menores los impactos que generan al ambiente. Además, son una fuente de energía para ser utilizada. La Figura 15 representa esta relación.

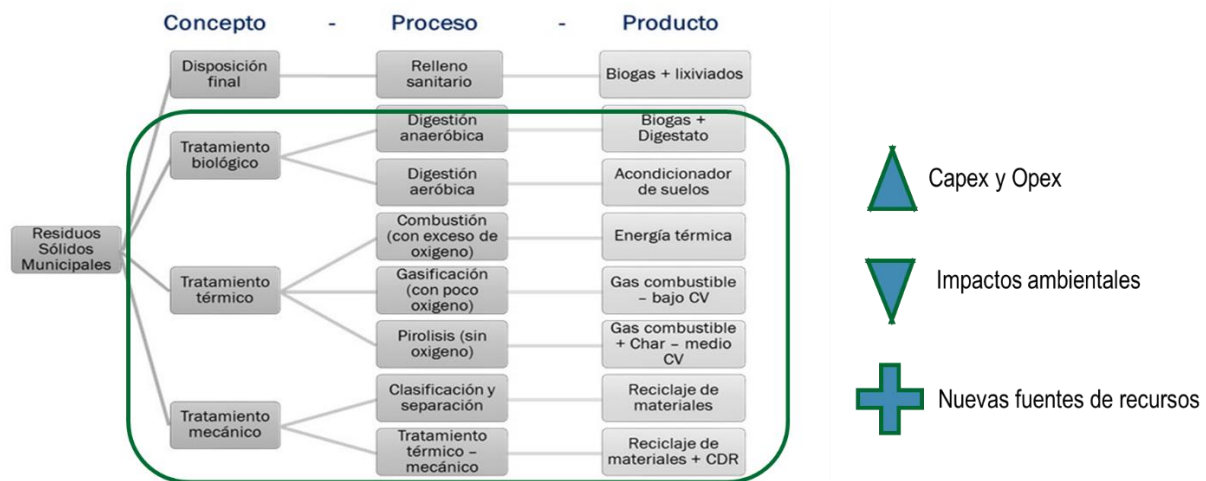


Figura 15. Alternativas de valorización de residuos vs disposición final. Fuente: Gasification of Waste (Darley) y modificado por el autor.

La Tabla 10. presenta el número de plantas de tecnologías de valorización de residuos por tipo instaladas en el mundo de acuerdo con Lamers (2017).

Tabla 10.

Número y escala de instalaciones de tecnologías de valorización de residuos en todo el mundo

TIPO	INSTALACIONES EN EL MUNDO	ESCALA PROMEDIO TON/HORA	ESCALA MÁXIMA TON/HORA	AREA DE PENETRACIÓN
PIRÓLISIS	25	4	8	Sur Este de Asia - Japón
GASIFICACIÓN	25	5	10	Japón - Canadá
GASIFICACIÓN ESCALONADA	75	5	15	Alrededor del mundo
PLASMA - GASIFICACIÓN	12	5	8 (35)*	Sur Este de Asia - Japón - Canadá - Europa **
COMBUSTIÓN	>1700	20	40	Estados Unidos - Europa - Asia - resto del mundo

* La instalación de gasificación por plasma de Teesside en la puesta en marcha aún no se ha contado como operativa, sin embargo, tiene una escala de alrededor de 35 toneladas / hora.
 ** Teesside UK y Europlasma en Francia están en resultados operativos (extendidos) de inicio que se esperan pronto.

Fuente: Qualification of Alternative Systems for the Thermal Conversion of Municipal Solid Waste. ReSource - Energy from Waste, pag 310 (Lamers, 2017) y ajustada por el autor.

Con el ánimo de presentar un resultado particular que analiza diferentes tipos de residuos usados como combustibles para WtE como incineración con aprovechamiento energético, gasificación, pirólisis, DA, se muestra la Tabla 11, extraída de Furrer y Walther (2018), en el estudio de factibilidad de una planta de WtE para la región metropolitana de Santiago de Chile. Allí se observa de forma referencial el nivel de éxito de la aplicación de cada tecnología a los diferentes tipos de residuos. Esta información es, a su vez, adaptada de Integrated Pollution Prevention and Control, Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration, European Commission (Neuwahl, 2019).

Tabla 11.

Análisis del uso de distintos tipos de residuos en las tecnologías WtE

Tecnologías		RSD		Otros residuos ⁹⁶			
		No tratados	Pre-tratados o seleccionados	Residuos Peligrosos	Residuos Biológicos Infecciosos	Lodos de plantas de tratamiento	Residuos Agrícolas o productos agrícolas
Combustión	Panilla alternada	++	++	-	-	+	-
	Panilla móvil	+	+	-	-	+	-
	Panilla de rodillos	+	+	-	-	+	-
	Panilla refrigerada	+	++	-	-	+	-
	Panilla con Horno rotatorio	+	+	+	-	+	-
	Horno Rotatorio	-	+	++	+	++	-
	Horno Rotatorio refrigerado	-	+	+	+	+	-
	Lecho Fluidizado burbujeante	--	+	-	+	-	-
	Lecho Fluidizado Circulante	--	+	-	++	-	-
	Lecho Fluidizado rotatorio	+	+	-	+	+	-
Gasificación convencional		--	-	--	--	--	--
Gasificación por Plasma		--	--	--	--	--	-
Pirólisis		--	--	--	--	--	++
Digestión Anaeróbica ⁽¹⁾		-	++	--	--	++	++
Fermentación ⁽²⁾		--	-	--	--	--	-

++: Utilizado ampliamente con éxito
 +: Se ha utiliza con éxito
 nota 1: solo fracción orgánica de los residuos

-: Normalmente no se utiliza
 --: Rara vez se ha utilizado o no ha tenido éxito,
 nota 2: solo fracción de aceites y grasas

Fuente: Estudio de factibilidad de una planta WtE para la Región Metropolitana de Chile (Furrer & Walther, 2018) (Furrer & Walther, 2018).

Analizando la Tabla 11 se puede observar la flexibilidad de las tecnologías de combustión, con respecto a su aplicación a residuos sólidos domiciliarios (RSD) y otros residuos, mientras que las tecnologías de gasificación y pirólisis presentan restricciones a pesar de los avances e innovaciones, toda vez que se han desarrollado para materiales homogéneos, donde la utilización de RSD aún está en perfeccionamiento y sin grandes experiencias a gran escala. Adicionalmente, y de manera definitiva, se puede decir que las plantas de DA son exitosas en el tratamiento de los residuos orgánicos, por lo tanto, son un valioso complemento a las tecnologías de combustión.

Utilizando la misma fuente de la Tabla 11, se plantean en la Tabla 12 algunos requerimientos de presentación y composición de los residuos domiciliarios, como tamaño de partícula, poder calorífico y si requieren pretratamiento o no, para ser utilizados en plantas de WtE.

Tabla 12.

Requerimientos de combustible RSD para las distintas tecnologías WtE

Descripción	Combustión			Gasificación		Pirólisis	Digestión Anaerobia
	Parrilla	Horno Rotatorio	Lecho Fluidizado	Convencional Turb. Vapor	Plasma Turb. a Gas		
Tamaño máximo [mm]	50 a 500	50 a 500	1 a 5	1 a 5	1 a 5	1 a 5	50
Poder calorífico [MJ/kg]	7–18	7–18	5.5–30	5.5–30	5.5–30	5.5–30	NA
Poder calorífico típico [MJ/kg]	8–11	8–10	8–20 [RDF]	8–20 [RDF]	8–20 [RDF]	8–20 [RDF]	NA
Pre-tratamiento requerido	M (< 500 mm)	M (< 500 mm)	TR	TR–CA	TR–CA	TR–CA	TR–CA
Pre-tratamiento opcional	SM–TR	SM–TR	CA–CM	CM	CM	CM	CM–T–QM–B

SM: Separación mecánica de elementos grandes

TR: Trituración

CA: Clasificación Automática

CM: Clasificación Manual

T: Pre-tratamiento Térmico

QM: Pre-tratamiento Químico

B: Pre-tratamiento Biológico

Fuente: Estudio de factibilidad de una planta WtE para la Región Metropolitana de Chile (Furrer & Walther, 2018).

De acuerdo con la información de la Tabla 12, se podría decir que las tecnologías de gasificación y pirólisis son más exigentes respecto a las de combustión o DA. En tamaño de partículas que recibe y en el pre-tratamiento requerido.

Adicionalmente, y como se plantea en Mavropoulos (2016), las plantas de gasificación y pirólisis para gestionar residuos sólidos urbanos todavía deben madurar, entre otros, por los siguientes aspectos:

- Desarrollar aplicaciones comerciales y de gran tamaño.
- Mejorar su eficiencia energética.
- Establecer condiciones para recibir materia prima no uniforme, como lo son los residuos.

Sin embargo, si se logra una mejora sustancial en estos procesos, esas técnicas podrán ser la próxima generación de soluciones comerciales en la valorización energética de los residuos sólidos.

Otros autores han establecido formas para indicar el grado de madurez de una tecnología, y cuándo se debería recomendar en un proyecto de acuerdo con condiciones locales o de presupuesto. Por ejemplo, en el Gráfico 2, se puede observar cómo Rosinski, Cerezo, y O'Connor (2011) describen mediante la Curva de Grubb las etapas de desarrollo y madurez comercial de las tecnologías de WtE. Esto es un referente muy interesante para la toma de decisiones, toda vez que los momentos de investigación, desarrollo, demostración, despliegue y madurez tecnológica, en un proyecto, son cruciales para definir cuándo se pueden desarrollar en una región.

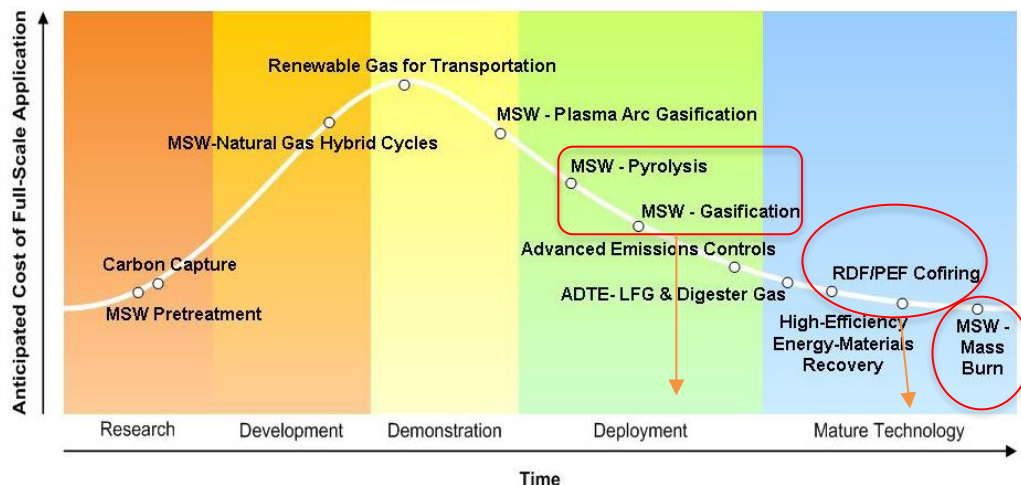


Gráfico 2. Curva de Grubb sobre las etapas de desarrollo y madurez comercial de las tecnologías de WtE.

Fuente: Waste to energy technology: Opportunities for Expanding Renewable Generation & Reducing Carbon Emissions (Rosinski, Cerezo, y O'Connor, 2011). Adaptada por el autor.

Por otro lado, es necesario considerar qué tipo de sistemas de tratamiento de residuos está en capacidad de implementar y asimilar un país o región, de acuerdo con el estado de desarrollo en que se encuentran respecto a los siguientes parámetros:

- Cobertura en recolección, transporte y disposición final.
- Nivel actual de tratamiento y aprovechamiento de los residuos.
- Normatividad o regulación asociada a la gestión de residuos.

Cuando se plantea el cumplimiento de estos componentes y su desarrollo respecto a la gestión de residuos en cada país o región del mundo, se da una clasificación por fases, esto se puede observar en la Figura 16. en la cual, se diferencian 4 fases o grupos de países, donde se refleja la división entre países, por ejemplo la fase IV es donde están los más desarrollados como Alemania y Dinamarca, mientras que la fase I corresponde al continente africano, partes de la India y Latinoamérica. Colombia está situado para esta clasificación en la fase II.

	Fase I	Fase II	Fase III	Fase IV
Recolección de residuos	<ul style="list-style-type: none"> Principalmente África, partes de India, Asia y LAC Baja cobertura urbana y rural 	<ul style="list-style-type: none"> BRIC, LAC, Asia → COLOMBIA Cobertura superior al 90% en ciudades Bajas coberturas en zonas rurales 	<ul style="list-style-type: none"> Ita, UK, USA Casi 100% de cobertura en todo el país 	<ul style="list-style-type: none"> Alemania, Suecia, Dinamarca, Suiza, Austria Cobertura del 100%
Procesamiento de residuos	<ul style="list-style-type: none"> Botaderos, cuerpos de agua, quema a cielo abierto Muy bajo reciclaje Sector informal de reciclaje - sin organizaciones 	<ul style="list-style-type: none"> Principalmente rellenos WtE en algunos rellenos Bajos % aprovechamiento Mezcla de sector formal e informal 	<ul style="list-style-type: none"> Relleno 40-60% Sistemas avanzados de WtE Reciclaje y compostajes > 30% Algunos materiales > 70% 	<ul style="list-style-type: none"> Cero rellenos Instalaciones de incineración WtE 20-50% y combinación de distritos térmicos Reciclaje y compostaje entre un 40-60%
Regulación normatividad	<ul style="list-style-type: none"> Falta de regulación y planeación No hay esquemas de responsabilidad extendida al productor. Inexistencia de políticas de prevención 	<ul style="list-style-type: none"> Requerimientos básicos del sistema regulados/normas Inexistencias de políticas de prevención en generación o bajo progreso 	<ul style="list-style-type: none"> Planeación y regulación avanzada Esquemas de responsabilidad extendida y embalaje Políticas básicas de prevención desplegadas 	<ul style="list-style-type: none"> Esquema regulatorio maduro Esquemas responsabilidad extendida y embalaje avanzados Políticas de prevención desplegadas con alto impacto

Figura 16. Fases o estado de regiones en el mundo de acuerdo con la gestión de residuos. Fuente: ISWA, 2013.

Por último, transcribo la respuesta que el señor Sr. Hakan Rylander, CEO del Grupo de Empresas SYSAV, le ofreció a Antonis Mavropoulos (Presidente de la ISWA), luego de preguntar si las tecnologías de gasificación o pirólisis podrían reemplazar la incineración:

Los residuos no son un combustible homogéneo. Hasta ahora ha resultado ser demasiado heterogéneo para poder tratarlo en un proceso de gasificación o pirólisis, independientemente de cómo pretrate los desechos. No es absolutamente aplicable para MSW mixtos con la tecnología actual. Otro factor muy negativo es que el balance de energía a menudo ha resultado ser negativo [...]. Desde un punto de vista ambiental, sería un método excelente si funcionara, con bajas emisiones y con un residuo muy pequeño y ambientalmente seguro, pero desafortunadamente la situación actual y las experiencias son las mismas hoy que hace casi 40 años, incluso sí ha habido y todavía hay esfuerzos para introducir gasificación y pirólisis en el mercado (Rylander, 2012).

6. MARCO METODOLÓGICO

Con el objeto de analizar la valorización energética de residuos vs relleno sanitario, se utilizó el método de la encuesta estructurada, la cual fue realizada a un grupo de personas seleccionadas por su conocimiento general y específico en la gestión integral de residuos sólidos, así como en las alternativas de valorización de residuos.

Los resultados de la encuesta se valoraron de acuerdo con lo establecido en el método de análisis multicriterio (Multi-Criteria Decision-Making- MCDA). Para ello se definieron las alternativas de valorización, los criterios y subcriterios (ver numeral 6.1), y se utilizó el proceso de análisis jerárquico (Analytic Hierarchic Process- AHP) para su interpretación.

Con este análisis se determinó la mejor opción de valorización energética para los residuos sólidos, que pueda ser recomendada a las Autoridades Locales del Valle de Aburrá, como alternativa a la disposición final en relleno sanitario.

El proceso metodológico desarrollado fue el siguiente:

- Revisión bibliográfica de artículos, investigaciones y documentos oficiales relacionados con el método de análisis multicriterio y el AHP.
- Elaboración de una encuesta estructurada, con preguntas cerradas para lograr una calificación de cada uno de los criterios y subcriterios considerados, al igual que la comparación entre sí, teniendo en cuenta los factores ambientales, económicos y sociales.
- Aplicación de entrevista- encuesta a 26 expertos en el tema (docentes, profesionales, etc.), Gerentes o directores técnicos de empresas operadoras de residuos significativas en Colombia.
- Análisis multicriterio mediante un proceso analítico jerárquico para establecer la mejor opción en la valorización de los residuos sólidos urbanos generados en el Valle de Aburrá.
- Unificación de los resultados obtenidos a través de las encuestas a expertos y la valoración de las alternativas mediante la metodología multicriterio.
- Presentación de resultados.

6.1 Metodología de análisis multicriterio para la gestión de residuos sólidos

El análisis multicriterio es una herramienta ampliamente utilizada en procesos de toma de decisiones en diferentes campos de la ingeniería, la economía y las ciencias sociales. La gestión de residuos sólidos es una disciplina idónea para la implementación de estas técnicas, dada la serie de impactos que estos tienen tanto a nivel técnico, financiero, ambiental y social.

De acuerdo con Atousa, (Atousa, Kasun, Bahareh, & Rehan, 2015) los métodos de análisis multicriterio (MCDM por sus siglas en inglés) se han utilizado como uno de los marcos de apoyo a la toma de decisiones más efectivos y exhaustivos en la gestión de residuos sólidos en el mundo, tanto para ubicar sitios para disposición final, como para plantear alternativas de aprovechamiento de acuerdo con las condiciones de los residuos, ya que esta metodología permite evaluar diversas opciones a través de diferentes criterios y subcriterios. Su popularidad se debe principalmente a que se diseña una estructura donde cada una de las partes interesadas (gobierno, técnicos, sociedad, etc.) pueden valorar sus problemas y soluciones, de forma que se logra llegar a una solución de manera concertada, poniendo de acuerdo las partes interesadas.

Para modelar esta problemática, se empleó el AHP por ser uno de los métodos más comúnmente aplicados en los estudios sobre gestión de residuos (Atousa et al., 2015), para calificar criterios y subcriterios en el MCDM, puesto que permite ponderar los criterios que definen el entorno de toma de decisiones. El AHP se basa en la comparación pareada de los diferentes criterios y subcriterios, obteniendo importancias relativas como, por ejemplo, comparar la importancia del criterio ambiental respecto al económico si la alternativa a analizar es la de gasificación (Muñoz & Romana, 2016). En la Figura 17 se muestra el proceso que se adelantó para aplicar el modelo de análisis multicriterio.

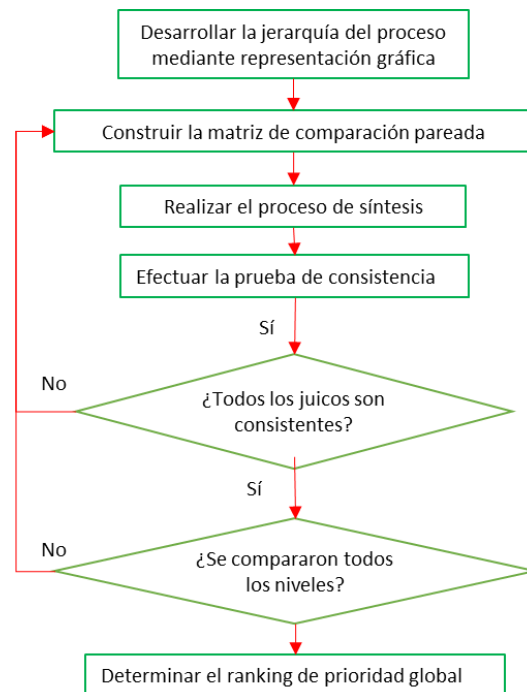


Figura 17. Proceso de modelación de un modelo de multicriterio. Fuente: (Saaty T. L., 2014).

De acuerdo con la metodología establecida en el Software Superdecisión, (Saaty T. L., 2014) y como lo presenta la Figura 17, se construyó una serie de matrices de comparación pareada entre los criterios, entre los subcriterios de cada criterio, y entre las alternativas para cada subcriterio, por esto se convierte en un proceso jerárquico. Para hacerlo se debe tener más de un nivel de decisión entre las alternativas y la tecnología a seleccionar. La Figura 18 presenta la forma de plantear la solución al problema. Para mayor información sobre la metodología de análisis multicriterio, así como en el método de análisis jerárquico, se pueden remitir entre otros textos a los siguientes: *La utilidad de los métodos de decisión multicriterio (como el AHP) en un entorno de competitividad creciente* (Berumen & Llamazares Redondo, 2007); *Aplicación de métodos de selección multicriterio discretos al análisis de alternativas en estudios informativos de infraestructuras de transporte* (Muñoz & Romana, 2016); *How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process* (Saaty & Katz, 1990); *Manual de Software Superdecisión* (Saaty T. L., 2014).

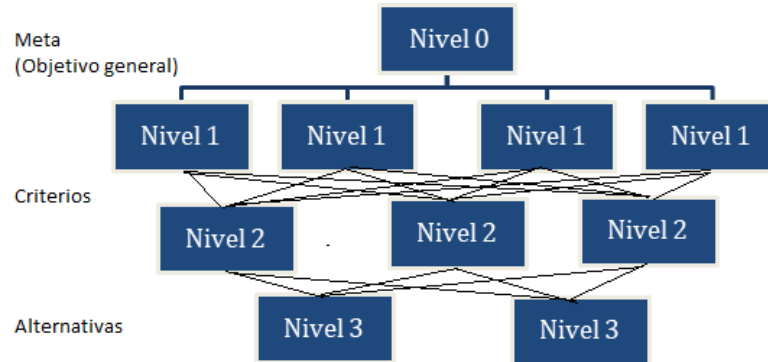


Figura 18. Niveles del modelo AHP. Fuente: Manual de Software Superdecisión (Saaty T. L., 2014).

En el caso particular de la presente investigación, se definió que las alternativas de valorización energética de residuos son las que se presentan en el numeral 5.4:

- Incineración con recuperación de energía.
- Gasificación.
- Pirólisis.
- Biodigestión, en esta también se expresa en términos de DA y compostaje.
- Rellenos sanitarios (esta tecnología se desarrolla porque es la de referencia).

6.1.1 Criterios

Los criterios que se consideraron son técnicos, económicos, sociales y ambientales, y para cada uno de ellos se plantean 4 subcriterios. En la Figura 19 se observa el resumen de esta estructura de alternativas, criterios y subcriterios.

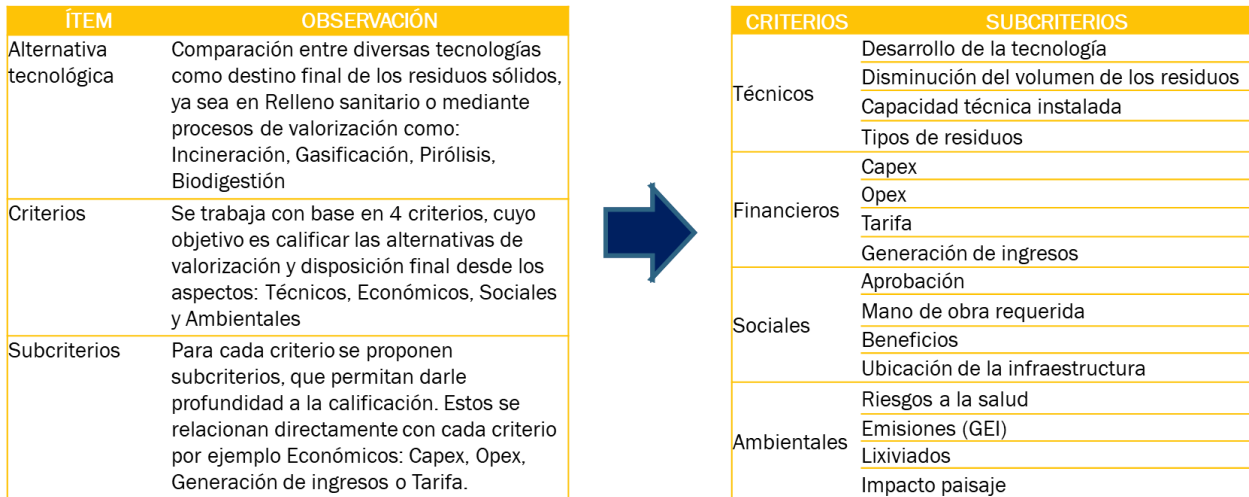


Figura 19. Alternativas tecnológicas, criterios y subcriterios. Fuente: Diagrama elaborado por el autor.

A continuación, se definen los criterios considerados en la investigación:

- **Criterios técnicos:** Son aquellos que permiten evaluar la idoneidad de una determinada tecnológica de tratamiento y valorización de residuos, mediante la evaluación de sus principales características (bien sea de enfoque, de diseño o intrínsecas), su complejidad, su versatilidad, robustez y fiabilidad en la operación, y su idoneidad teniendo en cuenta la propia naturaleza de la Región Metropolitana.
- **Criterios medioambientales:** Mediante estos criterios se logra valorar la idoneidad de una determinada tecnología de tratamiento y valorización de residuos, teniendo en cuenta los objetivos marcados desde un punto de vista medioambiental y de sustentabilidad: maximizar la tasa de reciclaje de residuos, minimizar la cantidad de residuos que serán finalmente depositados en relleno sanitario, evitar molestias en forma de ruido u olores, minimizar las emisiones y vertidos al medio, minimizar la generación de residuos, etc. En este punto es necesario recalcar que todas las alternativas consideradas deben cumplir con la normatividad ambiental colombiana, siendo esto un punto de partida.
- **Criterios sociales:** Este criterio permite evaluar la idoneidad de una determinada tecnología de tratamiento y valorización energética de residuos, analizando en este caso el grado de aceptación social, así como las posibles consecuencias sobre parámetros tan importantes como el empleo y la salud.

- **Criterios financieros:** En estos criterios se evalúa su relevancia respecto a las inversiones, el costo de operación, los ingresos, si se reflejan por la tarifa, y viabilidad económica del proceso.

6.1.2 Subcriterios

Los subcriterios son elementos considerados relevantes para justificar los criterios. Por ejemplo, entre los financieros están las inversiones requeridas, los costos de operación, la tarifa que se percibe por el servicio de aseo, y si el desarrollo de esta nueva alternativa genera nuevos ingresos. En la Tabla 13 se presenta la descripción de los subcriterios.

Tabla 13.

Justificación de los subcriterios

CRITERIOS	SUBCRITERIOS	JUSTIFICACIÓN
Técnicos	Desarrollo de la tecnología	Estado de desarrollo de la tecnología, si existen proyectos desarrollados en el mundo a escala industrial o solo a escala piloto industrial o de investigación.
	Disminución del volumen de los residuos (DVR)	Plantea que, a mayor disminución de residuos al desarrollar el proceso, mejor la alternativa.
	Capacidad técnica instalada	Si para el desarrollo de este tipo de proyectos se requiere personal calificado, y que este a su vez sea de difícil consecución.
	Tipos de residuos	A mayor tipología de residuos que reciba, será mucho mejor. Además, si los recibe mezclados es positivo, pero si requieren clasificación es negativo.
Financieros	CAPEX	Corresponde a la inversión en equipos e infraestructura necesaria para el desarrollo del proyecto, por lo tanto, a mayor monto de inversión requerido, menos atractiva será la alternativa.
	OPEX	Corresponde a los costos de la operación de la alternativa, por lo tanto, a mayores costos de la operación, menos atractiva es la alternativa.
	Tarifa	Corresponde al valor definido por el regulador para el cobro por el servicio a los usuarios y el cual considera los precios de un mercado competitivo, y tienen en cuenta no solo los costos sino los aumentos de productividad esperados. Acá se debe analizar si la tarifa actual del servicio de disposición final logra solventar la implementación y operación del nuevo proceso, lo cual sería positivo para la alternativa.
	Generación de ingresos	Si al aplicar la nueva tecnología se logran generar ingresos adicionales por venta de subproductos (eso es positivo), por

		ejemplo, venta de energía, venta de materiales reciclables, venta de compost, etc.
Sociales	Aprobación	Grado de aprobación de la comunidad para desarrollar este proyecto, qué referencias se tienen de la comunidad o qué se espera al respecto.
	Mano de obra requerida	Número de personas que se requieren para la operación de la alternativa. A mayor número de trabajadores mayor valoración.
	Beneficios	Si la comunidad percibe beneficios al permitir realizar el proyecto, por ejemplo, nuevos empleos para la comunidad, disminución de costos en servicios, desarrollo de infraestructura, etc.
	Ubicación de la infraestructura	Si la ubicación puede ser en la región metropolitana, o donde se va a utilizar la energía a generada, será una alternativa positiva. También será positivo si se utilizan zonas ya impactadas, por ejemplo, en la ubicación del relleno sanitario.
Ambientales	Riesgos a la salud	Si su operación puede generar enfermedades en la población cercana, será una alternativa negativa.
	Emisiones (GEI)	Su operación será positiva si contribuye en la disminución de las emisiones de GEI.
	Lixiviados	Si el proyecto continúa con la generación de lixiviados es negativo, será positivo si se deben tratar menos de estos líquidos.
	Impacto paisaje	Si el impacto al paisaje es muy alto entonces su valoración será negativa.

Fuente: elaboración del autor. (INERCO - UPME, 2018), (Wilson, y otros, 2015)

6.1.3 Proceso de análisis jerárquico

El proceso de decisión para determinar, entre varias alternativas tecnológicas, cual es la más adecuada para gestionar los residuos sólidos, así como para cualquier otro proyecto, puede resultar bastante complejo. A pesar de ello, es posible mediante el análisis multicriterio, y más aún con el apoyo del proceso de análisis jerárquico AHP, que requiere analizar las tecnologías comenzando con los subcriterios y continuando con los criterios hasta hallar una alternativa, utilizando el conocimiento, la experiencia y la referenciación documental.

De acuerdo con los criterios y subcriterios establecidos para la investigación, utilizando los modelos del numeral 6.1 (Figura 18 y Figura 19) se plantea el relacionamiento del AHP de la Figura 20.

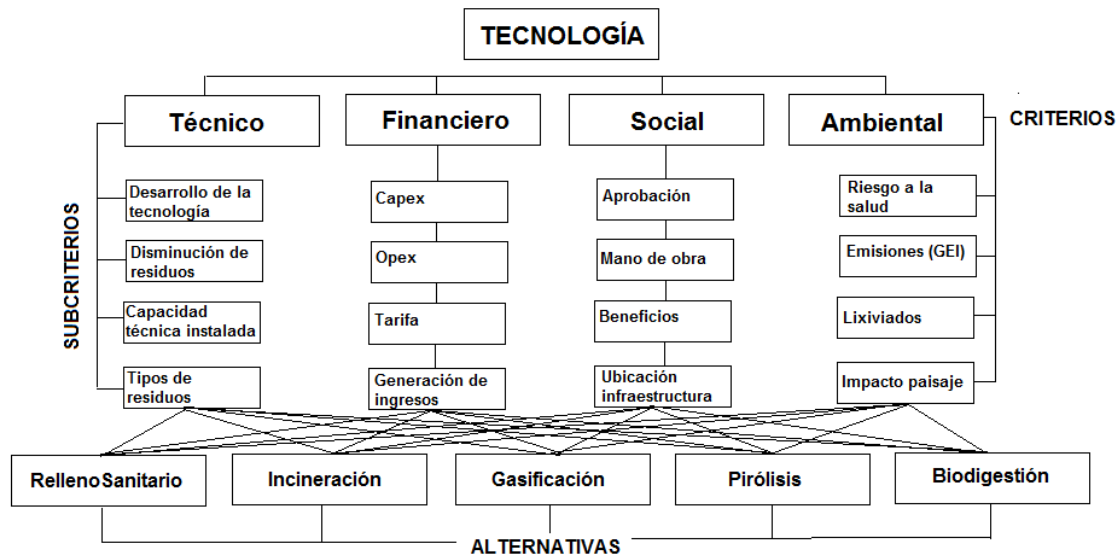


Figura 20. Proceso de análisis jerárquico. Fuente: Proceso elaborado por la Doctora Diana María Agudelo Echavarría a partir del Manual de Software Superdecisión (Saaty T. L., 2014).

Para valorar las alternativas, criterios y subcriterios, se desarrolla el proceso que se presenta en la Figura 21, donde se utilizan matrices pareadas, para generar un resultado o vector numérico, que será utilizado junto con el resultado de las encuestas para definir la mejor alternativa.

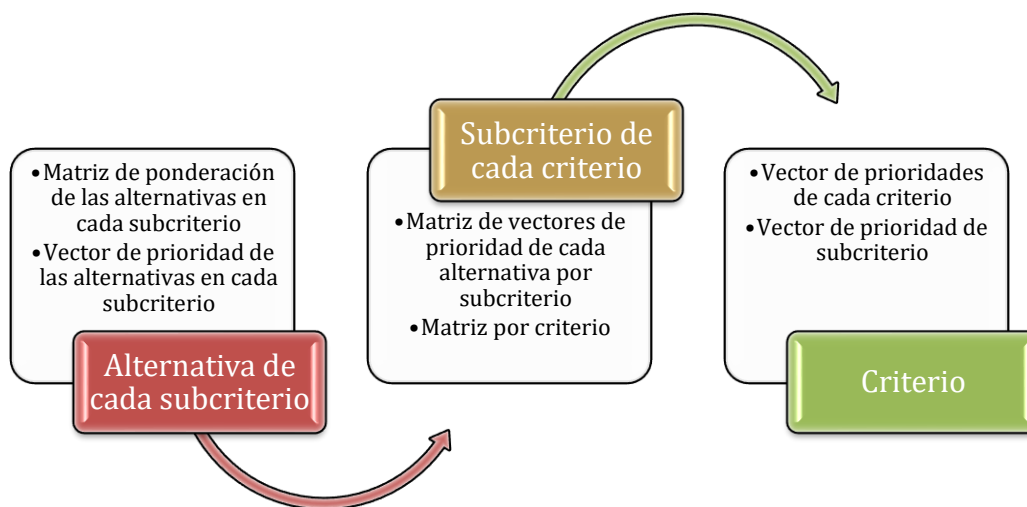


Figura 21. Proceso de análisis entre alternativas, criterios y subcriterios. Fuente: Elaboración del autor.

El proceso de decisión incluye en una primera fase la operación que se observa en la Figura 20, donde se establecen relaciones entre un criterio y un sub criterio para cada alternativa y así

sucesivamente hasta completar unas 100 comparaciones, la Figura 21 desarrolla la metodología del AHP, allí se plantean operaciones matemáticas en forma de matrices que al final establece un factor para cada alternativa, o que permite priorizar. En este proceso se podrá observar que tanto el autor como los expertos, incorporan experiencia, conocimiento y también durante el proceso de decisión. Es importante destacar que esta metodología es utilizada en múltiples procesos de este tipo, lo cual valida y respalda su utilización (Muñoz & Romana, 2016).

De acuerdo con lo planteado en *La utilidad de los métodos de decisión multicriterio (como el AHP) en un entorno de competitividad creciente*, Berumen & Llamazares Redondo (2007) señalan:

La consistencia tiene dos propiedades simultáneas. La primera sobre la transitividad de las preferencias, que indica que los juicios emitidos deben respetar las condiciones de transitividad originados al comparar más de dos elementos. Es decir: si w_1 , es mejor que w_2 , y w_2 es mejor que w_3 , entonces se espera que w_1 sea mejor que w_3 . La otra propiedad se refiere a la proporcionalidad de las preferencias. Es decir, juicios enteramente consistentes implican, además de la propiedad de transitividad, la proporcionalidad entre ellos. Esto significa que, si w_1 es tres veces mejor que w_2 , y w_2 es dos veces mejor que w_3 , entonces se espera que w_1 sea seis veces mejor que w_3 .

Para determinar estos valores será necesario desarrollar un número determinado de matrices por pares entre subcriterios, criterios y alternativas, las cuales dependen del número de operaciones entre estas. Para el caso de esta investigación se trabajó con 21 matrices:

- 1 matriz de criterios.
- 4 matrices de subcriterios.
- 16 matrices de alternativas con respecto a los subcriterios.

Para elaborar estas matrices se calificó cada uno de los ítems que pertenecían al árbol jerárquico, utilizando la escala numérica de Saaty (1990), expresado en juicios de valor entre criterio y alternativas, resaltando dominancia o preferencia entre ellos. Esta acción, de acuerdo como lo expresa la Figura 17, permite determinar el ranking de prioridad global.

De otro lado, el método AHP define, en la forma de evaluar, la proporción de consistencia o índice de reciprocidad de la calificación dada por el tomador de decisión. El resultado de dicha fórmula debe ser aceptable, por lo tanto, menor del 10% ($RC < 10\%$) (Muñoz & Romana, 2016),

ya que, si el valor es mayor, se debe calcular nuevamente hasta que se cumpla con el requisito de ser menor del 10%.

Con base en lo anterior, en este caso se realizó la prueba de consistencia a las 21 matrices,

$RC = IC/IA$, donde:

- IC: Es el índice de consistencia.
- IA: Es el índice aleatorio.

El índice de consistencia se calcula para cada matriz, utilizando la fórmula:

- $IC = (\lambda_{max} - n) / (n - 1)$
- λ_{max} = resulta de una multiplicación de matrices. Luego este resultado se multiplica por un vector promedio tomado de la matriz de calificación inicial, cuyo resultado se promedia.
- n= el número de variables que se comparan ya sea criterio, subcriterios (4 cada uno) o variables (5).

El índice aleatorio depende de n y se toma de la Tabla 14, de acuerdo con el número de elementos que se comparan. En esta investigación los valores utilizados fueron 4 para las matrices de criterios y subcriterios y 5 para las matrices de las alternativas (según las variables).

Tabla 14.

Índice aleatorio (IA)

ÍTEM	Valores									
Número de elementos que se comparan	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice de consistencia aleatorio (IA)	0	0	0,58	0,89	1,11	1,24	1,32	1,4	1,45	1,49

Fuente: (Berumen & Llamazares Redondo, 2007)

Al tener las 21 matrices pareadas, es necesario desarrollar una serie de operaciones hasta obtener una sola matriz de 5x1, que permita ordenar de mayor a menor el resultado de las alternativas, de acuerdo con la experiencia y valoración del autor. Para llegar a este resultado es necesario seguir el proceso planteado por Saaty (2014), y muy bien resumido por Berumen y

Llamazares (2007). A continuación, se describen el proceso de construcción de las matrices pareadas y la obtención de una alternativa priorizada:

- Se elaboran las matrices pareadas, comparación entre columnas y filas de cada matriz de acuerdo con la importancia o relevancia de un criterio o subcriterio sobre otro.
- Las matrices pareadas deben ser normalizadas, y la forma de obtenerlo es la siguiente: primero se deben sumar los valores de cada columna y obtener los subtotales correspondientes, luego se divide cada valor de la matriz con la sumatoria de su respectiva columna. Esta nueva matriz de 4x4 se denomina matriz de comparaciones normalizadas.
- Se obtiene un vector promedio de 4x1, a partir del valor promedio de cada fila de la matriz normalizada de criterios y de subcriterios.
- Los 4 vectores promedio de los criterios conforman una nueva matriz que será utilizada más adelante, los 16 vectores promedios de los subcriterios permiten conformar 4 matrices (5x4) de alternativas– subcriterios.
- La matriz normalizada de alternativas– subcriterios de 5x4 y el vector promedio (4x1) obtenido de los criterios se multiplican entre sí mediante la función de Excel de matrices múltiples (MMULT) para generar un vector de prioridad de 5x1.
- Los 4 vectores de prioridad (de 5x1 criterios), permiten conformar una matriz de 5x4.
- La última matriz conformada se multiplica por el vector de promedio, esta matriz por este vector se multiplica (utilizando la fórmula MMULT) para obtener el vector de prioridad total de 5x1.
- El vector de prioridad total es el resultado de la ponderación del autor.

En el numeral 7.1 se presentan algunas de las operaciones enunciadas anteriormente.

6.2 Elaboración de Entrevista- Encuestas

La valorización energética de residuos hace parte de un conocimiento experto. Dadas las restricciones en este sentido, se hizo necesario trabajar con información secundaria y relacionar esta información con el criterio de profesionales con conocimiento teórico al respecto.

Por lo anterior, se utilizó el método del muestreo discrecional (Corporación Universitaria UNITEC, 2015) para seleccionar la lista de profesionales a encuestar. Esta metodología permitió seleccionar los profesionales que se considera tienen la posibilidad de participar en la investigación, dada su formación, conocimiento y experiencia. Se eligieron 40 posibles candidatos, de los cuales 26 dieron respuesta afirmativa a la encuesta.

Como anexo a la encuesta, a cada profesional se le suministró un archivo con información relevante sobre la valorización energética de residuos, la justificación del trabajo y la explicación de elementos básicos de las tecnologías planteadas en la investigación para cada una de las alternativas. En la Figura 22 se puede observar el modelo de encuesta enviado a los profesionales expertos, evidenciando las tecnologías, los criterios, subcriterios y la forma de calificar.

Las encuestas- entrevistas generaron un resultado basado en la opinión de los expertos. Posteriormente, este se utilizó para relacionarse con el resultado obtenido mediante la metodología de AHP por medio de operaciones matriciales con los vectores de prioridad por subcriterio y criterio explicados en el numeral 0. De esta manera se logró resolver la pregunta planteada en la investigación.

A continuación, se describe el paso a paso del proceso para obtener un resultado de las entrevistas- encuestas:

- La encuesta obtiene calificación de criterios, subcriterios y alternativas, valores que se listan en un archivo de Excel, utilizando una columna para el entrevistado, otra para la alternativa (tecnología), otra para el criterio, y una última para el subcriterio.
- La calificación de cada uno de subcriterios se opera bajo el criterio de suma (en el mismo subcriterio) para obtener un valor, el cual corresponde al criterio.
- Se continúa con una operación de suma de criterios de la misma alternativa.
- Se obtiene el promedio entre cada alternativa.
- Se ordena de mayor a menor las alternativas.

De la misma forma que la valoración de las entrevistas- encuestas, pero esta vez utilizando los resultados de subcriterios, criterios y alternativa del método AHP, se evalúan las entrevistas-encuestas. Este proceso se presenta a continuación.

- La calificación de cada uno de subcriterios se multiplica por el resultado del subcriterio: $\text{Subcriterio} \times \text{Vector promedio subcriterio}$.
- La sumatoria de cada 4 operaciones de $\text{Subcriterio} \times \text{Vector promedio subcriterio}$, genera un valor denominado Criterio.
- Se realiza la siguiente operación $\text{Subcriterio} \times \text{Vector promedio criterio}$, la cual genera un valor denominado Alternativa.
- Se realiza la sumatoria del valor Alternativa, y su resultado se utiliza en la siguiente operación: $\text{Alternativa} \times \text{Vector promedio total}$.
- El resultado de $\text{Alternativa} \times \text{Vector promedio total}$, genera un resultado de alternativa por encuesta.
- Se saca el promedio de las alternativas y se genera un valor definitivo de cada una de las alternativas.
- Se ordenan las alternativas de mayor a menor

FORMATO PARA ENTREVISTA - ENCUESTA A CONOCEDORES EXPERTOS DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS

Encuesta - entrevista	Formato para la calificación de las alternativas de disposición final y valorización de residuos sólidos para la región Metropolitana del Valle de Aburrá
Tecnología	Comparación entre diversas tecnologías como destino final de los residuos sólidos, ya sea en Relleno sanitario o mediante procesos de valorización como: Incineración, Gasificación, Pirólisis, Biodigestión
Criterios	Se trabaja con base en 4 criterios, cuyo objetivo es calificar las alternativas de valorización y disposición final desde los aspectos: Técnicos, Económicos, Sociales y Ambientales
Subcriterios	Para cada criterio se proponen subcriterios, que permitan darle profundidad a la calificación. Estos se relacionan directamente con cada criterio por ejemplo Económicos: Capex, Opex, Generación de ingresos o Tarifa.

Forma de calificar:	Califique de 0 a 5, siendo 0 el elemento más negativo y 5 el más positivo para su desarrollo. 0= Más costoso en inversión u operación (Capex y Opex), menos desarrollada la tecnología, etc.
----------------------------	---

TECNOLOGÍA	CRITERIOS	SUBCRITERIOS			
		Desarrollo de la tecnología	Disminución del	Capacidad técnica	Tipos de residuos
Relleno sanitario	Técnicos	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5
		0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5
	Financieros	Capex	Opex	Tarifa	Generación de ingresos
		0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5
	Sociales	Aprobación	Mano de obra requerida	Beneficios	Ubicación de la
		0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5
	Ambientales	Riesgos a la salud	Emisiones (GEI)	Lixiviados	Impacto paisaje
		0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5
Incineración	Técnicos	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5
		0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5
	Financieros	Capex	Opex	Tarifa	Generación de ingresos
		0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5
	Sociales	Aprobación	Mano de obra requerida	Beneficios	Ubicación de la
		0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5
	Ambientales	Riesgos a la salud	Emisiones (GEI)	Lixiviados	Impacto paisaje
		0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5
Gasificación	Técnicos	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5
		0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5
	Financieros	Capex	Opex	Tarifa	Generación de ingresos
		0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5
	Sociales	Aprobación	Mano de obra requerida	Beneficios	Ubicación de la
		0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5
	Ambientales	Riesgos a la salud	Emisiones (GEI)	Lixiviados	Impacto paisaje
		0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5
Pirólisis	Técnicos	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5
		0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5
	Financieros	Capex	Opex	Tarifa	Generación de ingresos
		0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5
	Sociales	Aprobación	Mano de obra requerida	Beneficios	Ubicación de la
		0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5
	Ambientales	Riesgos a la salud	Emisiones (GEI)	Lixiviados	Impacto paisaje
		0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5
Biodigestión	Técnicos	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5
		0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5
	Financieros	Capex	Opex	Tarifa	Generación de ingresos
		0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5
	Sociales	Aprobación	Mano de obra requerida	Beneficios	Ubicación de la
		0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5
	Ambientales	Riesgos a la salud	Emisiones (GEI)	Lixiviados	Impacto paisaje
		0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5

Observaciones - Comentarios	
Nombre	
Fecha	

Figura 22. Entrevista tipo encuesta enviada a los profesionales de residuos. Fuente: Elaboración propia.

7. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Con el fin de explicar los resultados obtenidos durante las diferentes etapas de la investigación, estos se distribuyen en tres numerales:

- Resultados de la valoración del autor.
- Encuestas diligenciadas.
- Resultados de la investigación.
- Análisis de resultados.

7.1 Resultados de la valoración del autor

Como se mencionó en el numeral 6.1.3, fue necesario calificar 21 matrices pareadas, con una matriz cuadrada que contiene comparaciones pareadas de criterios, subcriterios y alternativas. El criterio de calificación fue el establecido por la Escala de Saaty (Saaty & Katz, 1990), Tabla 15.

Tabla 15.

Escala de Saaty: Importancia relativa de cada criterio

ESCALA NUMÉRICA	ESCALA VERBAL
1	Ambos elementos o criterios son de igual importancia.
3	Débil o moderada importancia de uno sobre el otro.
5	Importancia esencial o fuerte de un criterio sobre el otro.
7	Importancia demostrada de un criterio sobre otro.
9	Importancia absoluta de un criterio sobre otro.

Fuente: (Saaty & Katz, 1990).

En la Tabla 16. se puede observar un ejemplo de la forma como se calificó la matriz pareada de los subcriterios del criterio técnico. La primera parte de la tabla refleja la forma de valorar y la segunda, el resultado de esta valoración en cada celda.

Tabla 16.

Ejemplo de calificación de una matriz pareada

Técnicos	Desarrollo	DVR	Capacidad	Tipos de residuos
Desarrollo	1	3	5	3
DVR	1/3	1	3	5
Capacidad	1/5	1/3	1	1/5
Tipos de residuos	1/3	1/5	5	1


Desarrollo	1,0	3,0	5,0	3,0
DVR	0,3	1,0	3,0	5,0
Capacidad	0,2	0,3	1,0	0,2
Tipos de residuos	0,3	0,2	5,0	1,0
Total	1,9	4,5	14,0	9,2

La calificación dada representa la contribución al objetivo o la importancia relativa definida por el decisor entre cada uno de los criterios o subcriterios representados en las matrices. Por ejemplo, la celda A1-3 (A_{ij}) de la Tabla 16., se debe leer de izquierda a derecha (círculo). Allí se determinó que el desarrollo de la tecnología es más relevante (calificación de 5) que la capacidad de residuos que pueda manejar. De acuerdo con lo anterior, la celda inversa $A_{3-1} = 1/5$, en la misma Tabla 16 (cuadrado) la capacidad de la tecnología es $1/5 = 0,2$, frente al desarrollo de esta.

La matriz normalizada permite establecer un vector promedio por criterio, luego por tecnología, y por último el vector de prioridad total. Esta matriz se obtiene dividiendo el valor de cada celda por el valor de la sumatoria de la columna (subcriterio) de su posición. En la Tabla 17 se puede observar la matriz normalizada, el vector promedio (con el que se realiza la operación de multiplicación de matrices) y el vector resultante, denominado Vector de prioridad técnico.

Tabla 17.

Matriz normalizada x vector promedio = vector de prioridad técnico

Técnicos	Desarrollo	DVR	Capacidad	Tipos de residuos	Vector promedio *		Vector de prioridad Técnico
Relleno sanitario	0,0536	0,0426	0,2783	0,4170	0,470		0,128
Incineración	0,4791	0,4677	0,1360	0,2742	0,289		0,417
Gasificación	0,1084	0,2104	0,0502	0,1273	0,068		0,137
Pirólisis	0,1084	0,2104	0,0525	0,1273	0,172		0,137
Biodigestión	0,2505	0,0689	0,4831	0,0542			0,180

* Vector promedio: es el promedio la de la suma horizontal (0,536+0,662+0,357+0,326=0,470) de cada fila.

Como se presentó en el numeral 6 es necesario comprobar que el criterio de experto se mantiene consistente durante la valoración de las 21 matrices que fue necesario elaborar. En la Tabla 18 se puede observar el resultado de calcular el RC en todas las matrices. Allí se puede verificar que todos son menores del 10% o 0,10.

Tabla 18.

Valor calculado de RC

Valor calculado de RC										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,0587	0,0841	0,0443	0,0598	0,0761	0,0466	0,0574	0,0843	0,0460	0,0094	0,0094
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
0,0211	0,0464	0,0000	0,0000	0,0000	0,0094	0,0126	0,0000	0,0095	0,0160	

En la Tabla 19 se presenta la matriz de prioridad por alternativa y criterio y el vector promedio de alternativa, además el resultado de la multiplicación de matrices denominado Vector de prioridad total.

Tabla 19.

Vector de prioridad por alternativa y por criterio

Alternativa	Técnico	Financiero	Social	Ambiental	Vector promedio Alternativa	Vector de prioridad Total
Relleno sanitario	0,128	0,352	0,072	0,208	0,481	0,155
Incineración	0,417	0,151	0,207	0,201	0,098	0,301
Gasificación	0,137	0,171	0,207	0,156	0,210	0,159
Pirólisis	0,137	0,171	0,207	0,156	0,210	0,159
Biodigestión	0,180	0,155	0,308	0,279		0,225



Los datos de la Tabla 19 se calcularon utilizando la fórmula MMULT de Excel (devuelve el producto matriz de dos matrices), para obtener el vector de prioridad total. Este vector define el orden de prioridad por tecnología, lo que corresponde a la calificación del autor, el cual se puede observar en la Tabla 20. ordenado de mayor a menor.

Tabla 20.

Vector de prioridad total

Alternativa	Vector de prioridad Total
Incineración	0,301
Biodigestión	0,225
Pirólisis	0,159
Gasificación	0,159
Relleno sanitario	0,155

El resultado de la Tabla 20, corresponde a la priorización estimada y calculado por el autor, se observa claramente una intención de propender por una gestión de los residuos en el Valle de Aburrá, con tecnologías que privilegien la disminución de residuos en el relleno sanitario, con generación de subproductos de materiales reciclables, energía, biogás y compost, dejando al final el actual sistema de disposición final en relleno sanitario, que sería solo para aquellos residuos que no se pueden aprovechar o tratar. Un resumen del proceso se presenta en la Figura 23.

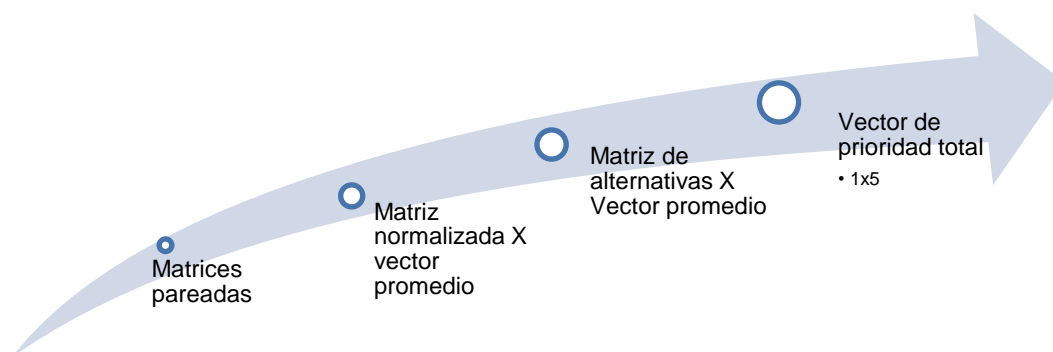


Figura 23. Resumen del proceso de priorización. Fuente: Elaboración propia.

7.2 Resultados de las encuestas diligenciadas

Se definió un listado de 40 profesionales que trabajan en la gestión de residuos, tanto en el ámbito local como internacional, con experiencia práctica y más de 10 años en el ámbito empresarial. Por esta razón se consideran expertos en residuos y adecuados para esta investigación. Adicionalmente, algunos de los profesionales participantes son reconocidos expertos internacionales que trabajan en temas relacionados con la valorización de residuos, ya sea desde la consultoría, el diseño, la investigación o el Gobierno Nacional, algunos como Magda Carolina Correal, Leonardo Navarro, Henry Colorado, Francisco Barras, David Pintre, André Gómez, Sandra Mazo-Nix y Xavier Elías Castells. En la Tabla 21 se presenta el listado de profesionales que diligenciaron la encuesta.

Tabla 21.

Listado de encuestas enviadas y diligenciadas.

Nº	NOMBRE	EMPRESA	ENVIADA	RESUELTA	NÚMERO
1	Diana Catalina Sierra Tobón	EPM	Sí	OK	1
2	Aura María Martínez Bustos	EPM	Sí	OK	2
3	María Cecilia Mesa Londoño	EPM	Sí	OK	3
4	Andrea Ruiz Diez	EPM	Sí	OK	4
5	Gabriel Fernando Vélez Patiño	EPM	Sí	OK	5
7	Mauricio González Echeverry	EPM	Sí	OK	13
10	Claudia Andrea Ortega Segura	SENA	Sí	OK	19
13	Jorge Antonio Yepes Vélez	EPM	Sí	OK	10
14	Francisco José Molina Pérez	UdeA	Sí	OK	23
15	Henry Alonso Colorado Lopera	UdeA	Sí	OK	17

Nº	NOMBRE	EMPRESA	ENVIADA	RESUELTA	NÚMERO
16	Magda Carolina Correal	Consultora	Sí	OK	9
17	Juan David Palacio Hernández	EPM	Sí	OK	7
18	Luis Aníbal Sepúlveda Villada	Acodal	Sí	OK	26
20	Diana Cardona	Kontrol Grün	Sí	OK	24
21	David Pintre	Sutco RecyclingTechnik GmbH	Sí	OK	11
22	Francisco Barras	Consultor IFC	Sí	OK	18
23	André Gomes	BIANNARECYCLING	Sí	OK	25
25	Juan Pablo Fonseca Cruz	Emvarias	Sí	OK	12
28	Alejandro Castro Dávila	Emvarias	Sí	OK	8
29	Catalina Hernández León	Emvarias	Sí	OK	6
31	Luis Eduardo Zapata Giraldo	Veolia	Sí	Ok	27
32	Carol Ximena Ruiz	EPM	Sí	OK	21
34	Leonardo Navarro	MinVivienda	Sí	OK	20
36	Mauricio Facio Lince Prada	Consultor	Sí	OK	16
37	William Ramírez	Valueskies	Sí	OK	22
39	Sandra Margarita Mazo-Nix	Consultora	Sí	OK	15
40	Xavier Elías Castells	Consultor	Sí	OK	14

Las encuestas fueron atendidas por 26 profesionales, entre ellas 8 de expertos internacionales. El ejemplo de una encuesta diligenciada se presenta en la Figura 24.

TECNOLOGIA	CRITERIOS	SUBCRITERIOS			
		Desarrollo de la tecnología	Disminución del volumen de los residuos	Capacidad técnica instalada	Tipos de residuos
Relleno sanitario	Técnicos	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5
		0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5
	Financieros	Capex	Opex	Tarifa	Generación de ingresos
		0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5
	Sociales	Aprobación	Mano de obra requerida	Beneficios	Ubicación de la infraestructura
		0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5
	Ambientales	Riesgos a la salud	Emisiones (GEI)	Lixiviados	Impacto paisaje
		0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5
Incineración	Técnicos	Desarrollo de la tecnología	Disminución del volumen de los residuos	Capacidad técnica instalada	Tipos de residuos
		0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5
	Financieros	Capex	Opex	Tarifa	Generación de ingresos
		0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5
	Sociales	Aprobación	Mano de obra requerida	Beneficios	Ubicación de la infraestructura
		0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5
	Ambientales	Riesgos a la salud	Emisiones (GEI)	Lixiviados	Impacto paisaje
		0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5	0 1 2 3 4 5

Figura 24. Parte de una encuesta diligenciada

Adicional al diligenciamiento de la entrevista– encuesta se recibieron comentarios relevantes de parte de algunos de los expertos, los cuales permiten profundizar en el análisis de los resultados. En particular se resalta la participación y comentarios de los profesionales Xavier Elías Castells, Francisco Barras y David Pintre, expertos internacionales y conocedores de la realidad en la Región Metropolitana, así como de la gestión de Empresas Varias por diversos viajes que han realizado al país. De igual manera, la participación de Luis Aníbal Sepúlveda, experto local y amigo personal. Los comentarios son los siguientes.

Xavier Elías Castells³:

- *Las tecnologías no son comparables*
- *Tarifa mínima técnica para el depósito seguro en relleno sanitario (según normas de la UE) es 32 Euros/t.*
- *En Europa ningún RSU puede ir a relleno o a incineración sin tratamiento previo.*
- *La mayoría de las plantas de incineración de la UE, generan solo calor (Distric Heating). Las del sur de Europa producen electricidad, pero desde 2011 están obligadas a producir menos electricidad y aumentar la cantidad de calor y/o frío.*
- *Hoy en día existen tecnologías muy eficientes (no se trata del modelo tradicional) para la sustitución del GN o el Carbón por CDR (Combustibles Derivados del Residuo) en numerosas industrias. Ello hace parte del WtE.*
- *Sobre la gasificación expresó lo siguiente: Se debe diferenciar 3 tipos de tecnologías:*
 - *La que genera syngas para oxidarlo y generar calor. Funciona la mayoría ellas. El residuo sólido urbano RSU hay que convertirlo en CDR.*
 - *El segundo lugar es la producción de electricidad con motor Otto. Muy pocas funcionan bien. La limpieza de gases es fundamental.*
 - *El tercer escalón, y el más sofisticado, es el de ENERKEM que convierte el syngas en alcoholes (biocarburantes de segunda generación). El metanol es el producto químico más usado y es considerado el proceso del futuro.*
- *La gasificación es la tecnología de conversión energética con mayor futuro, por ser entre otras la tecnología que más carbono retiene en el proceso.*
- *En la pirólisis es conveniente que el residuo sea muy homogéneo. No vale el RSU.*

³ Xavier Elías Castells, Ingeniero Industrial y Doctor en Ingeniería Industrial, experto senior, en instituciones españolas y sudamericanas. Consultor internacional de medioambiente y energía, autor de diversos libros. Barcelona, España.

- *Como sistema para el tratamiento de residuos, el digestor anaerobio solo puede tratar la fracción orgánica del residuo doméstico, siempre que haya sido separado en la fuente.*

Luis Aníbal Sepúlveda⁴:

Deja por fuera el compostaje como una de las alternativas más viables en Colombia. La definición de variables debiera tener mayor definición y desarrollo de los criterios para lograr mayor precisión en la calificación de las alternativas. Las definiciones técnicas de las alternativas requieren mayor desarrollo conceptual. El desarrollo tarifario, que no internaliza beneficios o impactos, no permite ser calificado con objetividad. Falta decir que la tarifa está orientada para el caso colombiano, por la regulación que tiene. Hoy todos los precios de tarifa de tratamientos están referenciados con Relleno Sanitario. Los costos de Relleno Sanitario no internalizan los impactos. Luego la calificación va a generar sesgos al momento de elaborar conclusiones. Esto es muy importante en un proyecto de investigación. El CICLO, de uso de los combustibles generados en los aprovechamientos térmicos, no deja ver que, al usar estos combustibles, genero nuevamente GEI, para una visión de REDUCIR EFECTIVAMENTE GEI. Es muy importante, que la pregunta de desarrollo tecnológico sea referenciada para Colombia específicamente, y se debiera dejar abierta la calificación, o realizar esta aclaración en las instrucciones de calificación. INVESTIGACIÓN ALTAMENTE ÚTIL, siempre y cuando se incluya el COMPOSTAJE. LA MATRIZ puede arrojar resultados sesgados, frente a la alternativa de Relleno Sanitario, lo cual es altamente riesgoso, al momento de su colocación en público.

Francisco Barras Quilez⁵:

Se entiende que todos estos procesos deben venir precedidos de un tratamiento previo de clasificación para recuperar materiales o productos, y/o depurar impropios, o de acondicionamiento de los residuos, para optimizar dichos procesos.

David Pintre Monreal⁶:

Cada ruta tecnológica tiene sus pros y sus contras, además de ser un elemento complementario de una solución más amplia, es decir, la biodigestión requiere de un tratamiento mecánico previo donde se eliminen ciertas impurezas o materiales contaminantes/ dañinos al proceso de biodigestión, además de que el propio proceso de biodigestión genera un "rechazo" que debe ser posteriormente tratado (ese lodo o digestato debe estabilizarse antes de depositar en relleno o dar una segunda vida como material apto para reforestación, cubierta de relleno etc... La gasificación, igualmente, precisa de un tratamiento mecánico previo; al igual que la incineración, donde deben

⁴ Luis Aníbal Sepúlveda Villada. Ingeniero Sanitario UdeA, Especialista Ing. Ambiental U de San Pablo-Brasil, Msc Medio Ambiente y Desarrollo, U.Nal de Medellín. Gerente de Earthgreen, Director Ejecutivo de ACODAL Seccional Noroccidente. Experto en gestión de residuos sólidos, Director de Múltiples proyectos de carácter Regional respecto a la gestión integral de residuos sólidos.

⁵ Francisco Barras Quilez. Ingeniero Técnico de Obras Públicas, Especialista en Gestión de Residuos

⁶ David Pintre Moreal: International Sales Diretor / Vertrieb International SUTCO RecyclingTechnik GmbH

eliminarse cierta tipología de residuos y además pueden recuperarse materiales reciclables para el fomento de la economía circular (aquí debemos hacer la cuenta, entre otras, energética, para determinar si se consume más energía con el reciclaje de ciertos materiales de la que se genera por incineración, etc.). En resumen, debe optarse por una combinación de varias tecnologías para aportar la mejor solución técnica que debe adaptarse a (i) la tipología de residuo, (ii) la cantidad de residuo, y (iii) ciertas capacidades locales (industria local de reciclaje, disposiciones normativas etc.).

Considero importantes estos comentarios, toda vez que los profesionales que los realizan tienen gran experiencia y recorrido respecto a la valorización energética de los residuos sólidos, hacen observaciones y plantean recomendaciones en algunos aspectos de la investigación, por ejemplo, cuestionan la comparación de las tecnologías debido a su diversidad, o el no haber considerado el compostaje como otra de las tecnologías de valorización energética de los residuos. De todas maneras no dejan de participar en la investigación, realizan la encuesta y envían sus comentarios. A continuación, se plantea la posición del investigador de acuerdo con los comentarios de los encuestados:

- La comparación de las tecnologías es válida en la medida que se trata de definir el tipo de tecnología que podría ser más adecuada para la región, toda vez que estas han sido ofrecidas por diferentes proveedores tanto a la empresa de aseo de la ciudad como a la administración municipal de Medellín, bajo diferentes premisas y condiciones.
- La tecnología probada para valorizar casi cualquier tipo de residuo es la incineración.
- Las tecnologías de gasificación y pirólisis todavía no están completamente probadas para residuos sólidos urbanos. Si se logran poner a punto algunas plantas que se están construyendo en la actualidad (Estados Unidos, España, Canadá, Holanda), podrían ser la tecnología del futuro.
- La biodigestión es una gran alternativa para residuos orgánicos separados en fuente, pero el producto, que es un alto porcentaje de lo que entra, requiere de otros tratamientos. Esta tecnología se puede complementar con el compostaje.
- El compostaje es una gran alternativa para los residuos orgánicos, ya sean separados en fuente o para tratar el resultante de la digestión anaerobia. Es fundamental garantizar la utilización del producto que se obtenga ya sea abono o un mejorador de suelos.

- Para cualquiera de los procesos de valorización es necesario instalar plantas de separación, que tienen como objetivo aprovechar los residuos reciclables y mejorar las condiciones del residuo para su posterior inyección en los hornos.
- La regulación y la estructura tarifaria deben involucrar nuevas alternativas de tratamiento, mayores exigencias para el control ambiental, y permitir cobrar un mayor valor, dependiendo del sistema de tratamiento.

Las encuestas- entrevistas diligenciadas se listaron en un archivo de Excel de manera vertical (ver Tabla 22), de tal forma que permitieran los cálculos que se explicaron en el numeral 6.2.

Tabla 22.

Vista del archivo de resultados de la entrevista- encuesta

1	2	3	4	5	6	7
Encuestado	Tecnología	Criterio	Sub-criterio	Puntuación	Criterio	Alternativa
1	1	1	1.1	2	11,0000	27,0000
1	1	1	1.2	2		
1	1	1	1.3	3		
1	1	1	1.4	4		
1	1	2	2.1	3	11,0000	
1	1	2	2.2	3		
1	1	2	2.3	2		
1	1	2	2.4	3		
1	1	3	3.1	0	4,0000	
1	1	3	3.2	1		
1	1	3	3.3	2		
1	1	3	3.4	1		
1	1	4	4.1	1	1,0000	
1	1	4	4.2	0		
1	1	4	4.3	0		
1	1	4	4.4	0		
1	2	1	1.1	4	13,0000	50,0000
1	2	1	1.2	4		
1	2	1	1.3	3		
1	2	1	1.4	2		
1	2	2	2.1	1	9,0000	
1	2	2	2.2	2		
1	2	2	2.3	2		
1	2	2	2.4	4		
1	2	3	3.1	4	12,0000	
1	2	3	3.2	3		
1	2	3	3.3	2		
1	2	3	3.4	3		
1	2	4	4.1	4	16,0000	
1	2	4	4.2	3		
1	2	4	4.3	5		
1	2	4	4.4	4		
1	3	1	1.1	3	10,0000	40,0000

La operación que se presenta en la Tabla 22 corresponde a la valoración de las entrevistas–encuestas, de acuerdo con el criterio de los expertos, y sin afectarla por el criterio del autor. El resultado se presenta en la Tabla 23. y el Gráfico 3.

Seleccionar la incineración (combustión con aprovechamiento energético) como la principal opción para la gestión final de los residuos sólidos, seguida por la biodigestión, y el último lugar la disposición final en relleno sanitario, es un mensaje relevante, que debería ser analizado y puesto en práctica por las entidades territoriales, las autoridades ambientales, las empresas de aseo y los inversionistas, de tal forma que se propenda por un cambio en la forma de gestionar los residuos en la Región Metropolitana, con procesos de educación, separación, recolección selectiva, innovando en la forma de gestionar los residuos, toda vez que son fundamentales para que las diferentes tecnologías puedan funcionar adecuadamente.

Tabla 23.

Resultados de las encuestas sin aplicar el AHP

RESULTADO ENCUESTAS SIN AHP	
Alternativa	Promedio
Incineración	46,846
Biodigestión	46,115
Pirólisis	44,000
Gasificación	43,577
Relleno sanitario	39,038

Fuente: Elaborado por el autor con base en los resultados de las entrevistas– encuestas.

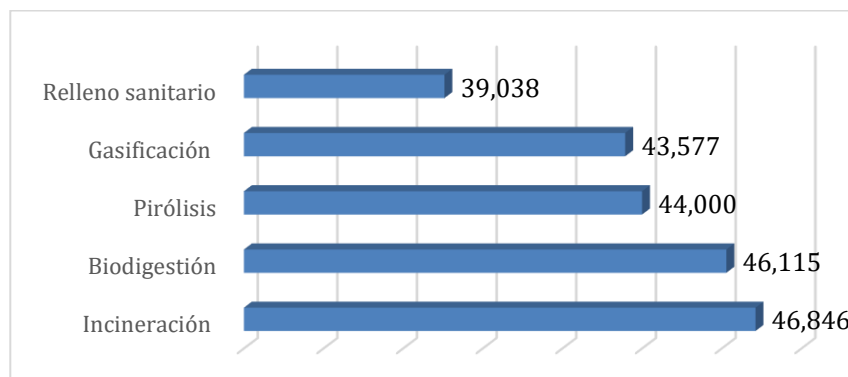


Gráfico 3. Resultados de las encuestas– entrevistas sin aplicar el AHP. Fuente: Elaborado por el autor con base en los resultados de las entrevistas– encuestas.

Este resultado demuestra que los expertos consideran que la utilización de los rellenos sanitarios debe ser la última opción para la gestión de residuos, y que se debe trabajar con nuevas tecnologías comenzando con la incineración y la biodigestión. Es importante reconocer que la mayoría de los expertos consultados son de nacionalidad colombiana.

7.3 Resultado de la investigación

Con los resultados obtenidos en los numerales 7.1 y 7.2 se realiza una serie de operaciones matemáticas, donde se multiplica el valor obtenido en el método AHP, tanto de subcriterios, criterios y alternativa, por la calificación de cada una de las encuestas– entrevistas. La operación matemática se puede observar en la Tabla 24. y se explica a continuación:

- Se multiplica la calificación (columna 5) por el valor del subcriterio y se genera la columna 6.
- Se suma los 4 subcriterios para cada criterio y se genera la columna 7 (Criterios).
- El dato de la columna 7 se multiplica por el criterio del método AHP y genera la columna 8.
- La suma de los datos de la columna 8 y por alternativa, genera la columna 9.
- Se multiplica la columna 9 por la alternativa del método AHP y se obtiene el valor de la columna 10.
- Se suman todos los datos de la columna 10 por alternativa y se divide por el número de encuestas para obtener el resultado final.

Este procedimiento se repite para todos los resultados de las encuestas, los cuales se listan en más de 2060 filas.

Tabla 24.

Vista del archivo de resultados de la entrevista – encuesta afectado por el método AHP

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Encuestado	Tecnología	Criterio	Sub-criterio	Puntuación	Subcriterio*Vpsubcriterio	Criterio	Criterio*Vpcriterio	Alternativa	Alternativa*Vptotal
1	1	1	1.1	2	0,1072	2,6953	0,345939876	1,921767506	0,298264133
1	1	1	1.2	2	0,0852				
1	1	1	1.3	3	0,8349				
1	1	1	1.4	4	1,6681				
1	1	2	2.1	3	1,4885	4,2000	1,480193842		
1	1	2	2.2	3	1,4885				
1	1	2	2.3	2	1,1324				
1	1	2	2.4	3	0,0906				
1	1	3	3.1	0	0,0000	0,2939	0,021122497		
1	1	3	3.2	1	0,0769				
1	1	3	3.3	2	0,1538				
1	1	3	3.4	1	0,0631				
1	1	4	4.1	1	0,3579	0,3579	0,074511291		
1	1	4	4.2	0	0,0000				
1	1	4	4.3	0	0,0000				
1	1	4	4.4	0	0,0000				

El Gráfico 4 presenta el resultado de la encuesta entrevista afectada por la valoración del autor (método AHP.)

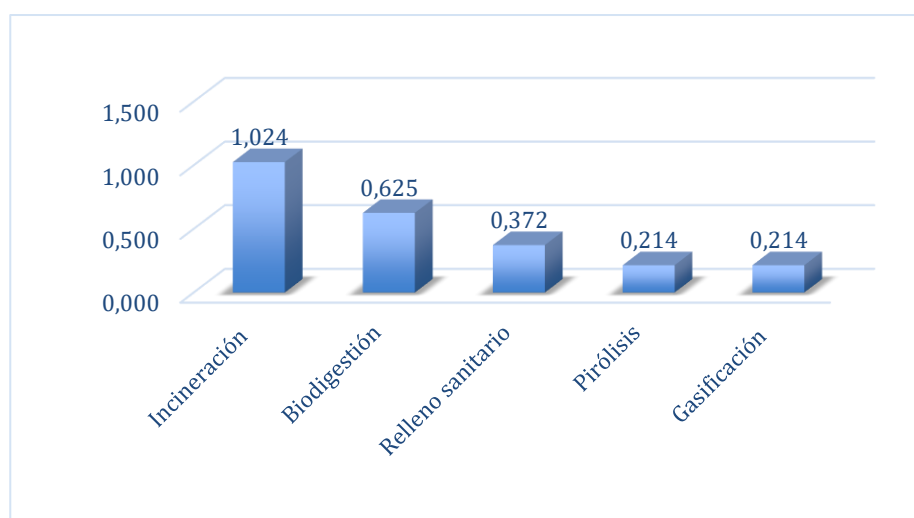


Gráfico 4. Resultado de la investigación

7.4 Análisis de resultados

La comparación de los tres resultados obtenidos se presenta en la Tabla 25. y el Gráfico 5.

Tabla 25.

Proceso de calificación y resultados

Proceso y resultados			
Tecnología	Autor	Encuestas*	AHP
Incineración	0,301	0,468	1,018
Biodigestión	0,225	0,461	0,625
Pirólisis	0,159	0,440	0,214
Gasificación	0,159	0,436	0,214
Relleno sanitario	0,155	0,390	0,372

*Los datos de la columna Encuestas se dividieron por 100 para facilitar la comparación de los resultados.

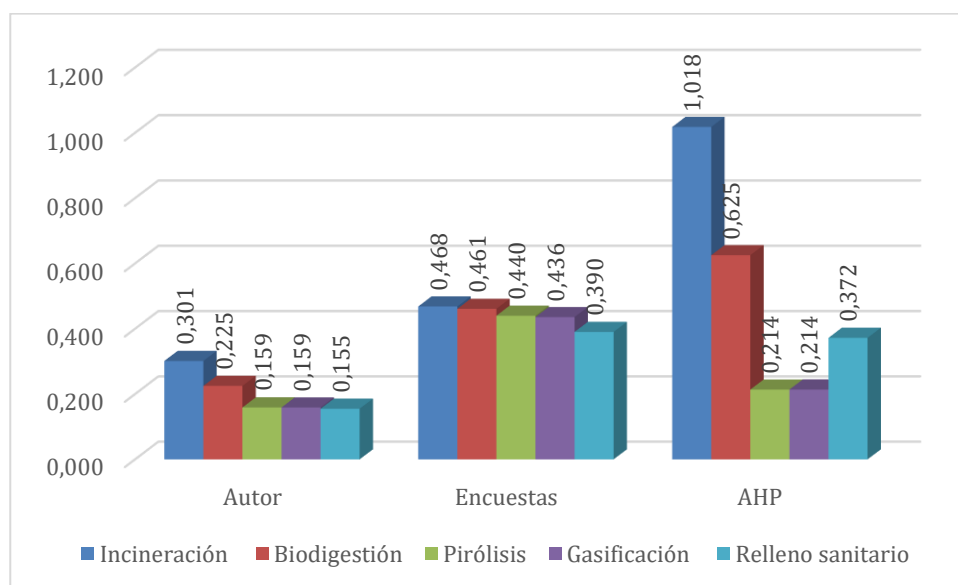


Gráfico 5. Proceso de calificación y resultados.

Al revisar los resultados de manera independiente se observa que para todos los participantes es relevante darle un cambio a la disposición final en relleno sanitario, mediante la utilización de otros procesos tecnológicos, como son la incineración (combustión con aprovechamiento energético) o la biodigestión (DA) de residuos orgánicos.

Es importante manifestar que una adecuada estrategia en la gestión integral de los residuos deberá comenzar por la educación en la no generación de residuos, la separación en la fuente y el aprovechamiento de residuos. El resultado final de la investigación se presenta en el Gráfico 6.

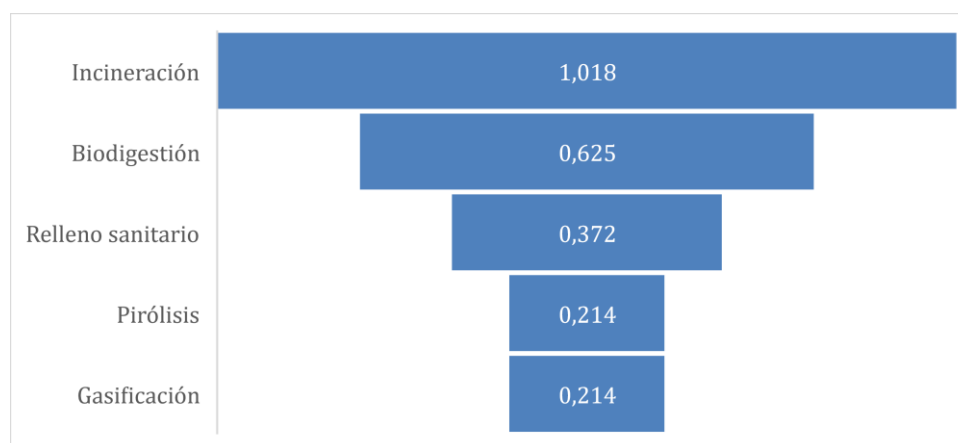


Gráfico 6. Alternativa seleccionada. Fuente: Elaborado por el autor con base en los resultados de las entrevistas-encuestas.

La tecnología de incineración es la más recomendada y aceptada de acuerdo con el resultado de la investigación. En segundo lugar, está la biodigestión, y en tercer lugar el relleno sanitario, lo que denota aún confianza en esta tecnología. Por último, se observa que existen reservas por las tecnologías de pirólisis y gasificación, dada su falta de desarrollos probados a escala industrial.

Es claro que se requieren desarrollar nuevas estrategias, así como utilizar tecnologías disruptivas e innovadoras para gestionar adecuadamente los residuos sólidos, considerando entre otros aspectos:

- Posicionar la cultura de la no basura, buscando que la ciudadanía disminuya la generación de residuos sólidos.
- Educar de manera continua y permanente a la ciudadanía respecto a la separación de los residuos en la fuente y la presentación de los residuos para una recolección selectiva.
- Incentivar en la comunidad la separación de los residuos sólidos.
- Establecer rutas selectivas para recoger los residuos aprovechables y no aprovechables de manera separada por parte de las organizaciones de recicladores y las empresas de recolección de residuos respectivamente.
- Incentivar el aprovechamiento de residuos reciclables y el tratamiento de los orgánicos.
- Proteger el ambiente, aire, fuentes de aguas superficiales y subterráneas, el paisaje, etc.

- Desarrollar parques tecnológicos para la gestión integral de diversos tipos de residuos sólidos, mediante aprovechamiento, tratamiento o valorización energética.
- Tener en cuenta las características del territorio y establecer dónde se requieren fuentes alternativas y renovables de energía.
- Disminuir las emisiones de gases efecto invernadero (CH₄, CO₂).

Con el ánimo de analizar la información recolectada y los resultados obtenidos, se puede decir que considerando la gestión de los residuos en Colombia, la forma como se establecen las condiciones para desarrollar proyectos, y que la normatividad y la regulación son las que definen tecnologías de referencia y recursos para inversión, lo más indicado para la aplicación de tecnologías de tratamiento, complementarias a la disposición final en relleno sanitario, es adelantar un proyecto por fases, de tal manera que se logre, entre otras cosas, lo siguiente:

- Impactar la cultura ciudadana, de tal manera que se disminuya la generación de residuos sólidos, y se incremente el reúso y la separación en la fuente.
- Establecer la recolección selectiva en todos los sectores de la región.
- Implementar Establecimientos de Clasificación y Aprovechamiento (ECAs) de residuos reciclables en la región metropolitana, así como plantas de separación de residuos no separados en fuente, de tal manera que se incremente el reciclaje y el aprovechamiento de los residuos.
- Adelantar por lo menos un proyecto de biodigestión para residuos orgánicos separados en fuente, de entre 50 y 100 ton/día.
- Adelantar estudios de factibilidad para la combustión con aprovechamiento energético de entre el 20 y el 50% de los residuos generados por la ciudad de Medellín, para aumentar la vida útil del relleno sanitario La Pradera.
- Gestionar ante el gobierno nacional, representado por los Ministerios de Vivienda Ciudad y Territorio, y Ambiente y Desarrollo Sostenible, la SSPD, La CRA, la CREG y la Dirección de Planeación Nacional (entre otros), cambios normativos, regulatorios y tarifarios, que viabilicen proyectos de valorización energética de residuos en Colombia.

8. CONCLUSIONES

A continuación, se plantean las conclusiones de acuerdo con los resultados obtenidos:

- La normatividad sobre gestión de residuos en Colombia busca, primero, la disminución de los residuos generados mediante la cultura ciudadana, crear estímulos a la separación desde la fuente, y el aprovechamiento con recicladores y empresas, así como generar obligaciones al sector industrial, mediante la responsabilidad extendida del productor y la motivación a la participación en la economía circular, tanto a la comunidad en general como a la empresarial.
- Países en desarrollo como Colombia, que tienen interés en nuevas tecnologías para el tratamiento y el aprovechamiento de los residuos sólidos, deben priorizar las alternativas con soluciones desarrolladas y probadas, toda vez que, primero, los recursos económicos son limitados; segundo, la tipología de residuos es diferente a las de los países desarrollados, más húmedos y con menor separación en la fuente y esto influye en el tipo de alternativa de valorización; y tercero, requiere capacitar un buen número de profesionales antes de la implementación de este tipo de tecnologías y será más factible cuando la tecnología sea madura.
- Las alternativas de valorización energética de residuos, en el ámbito mundial, se encuentra en diversos estados de desarrollo, siendo las más utilizadas en diversas partes del mundo (Estados Unidos, Europa, Asia) la incineración con aprovechamiento energético y la biodigestión. En países en desarrollo son muy pocas las experiencias positivas al aplicar alternativas como la incineración, casos como los de la India, donde se han puesto en funcionamiento cerca de una decena de plantas y en la actualidad funciona la mitad son prueba de ello. Este camino recorrido por estas naciones, así como por el desarrollo tecnológico permite que se hagan ajustes, además se requieren cambios en la gestión de los residuos en nuestras ciudades, por eso la separación en la fuente y las plantas de separación son indispensables antes de procesos de valorización energética de residuos.
- En múltiples referencias encontradas y descritas en la presente investigación, se define con claridad que, entre las tecnologías de gasificación, pirólisis e incineración o combustión con aprovechamiento energético, se recomienda seguir el camino de la combustión con aprovechamiento energético, toda vez que las más de 1500 plantas existentes en el mundo

respaldan esta tecnología (Kamuk, 2013). A su vez, recomiendan priorizar su ejecución por fases (ya sea por tamaño como por procesos) mientras se logran, principalmente, dos factores fundamentales:

- Lograr el cierre financiero del proyecto, y
 - Formar profesionales locales para que participen de manera directa de dichos proyectos.
- El resultado obtenido permite validar la metodología de Análisis de Decisión Multi-Criterio (MCDA) apoyada en el proceso de análisis jerárquico (AHP) para el análisis y la comparación de múltiples alternativas de gestión de residuos, en este caso la valorización energética comparada con la disposición final en relleno sanitario, toda vez que permite mirar desde diferentes aspectos las alternativas tecnológicas respecto a criterios y subcriterios, primero, desde el punto de vista de quien propone las opciones, segundo desde la perspectiva de personas conocedoras de esta problemática, quienes también califican y evalúan las opciones, para que finalmente aplicando operaciones matemáticas se combinen los resultados y se defina la alternativa más adecuada.
 - La alternativa recomendada para la valorización energética de los residuos sólidos generados en Medellín y la región metropolitana del Valle de Aburrá, de acuerdo con la investigación realizada. es la incineración, seguido por la biodigestión, y en tercer lugar la disposición final en relleno sanitario. El análisis de cada uno de las alternativas y los criterios reflejan que para la tecnología de incineración se considera muy fuerte en lo técnico, pero bajo en lo económico (altos costos) y presenta buena aceptación en lo ambiental y social. la biodigestión es fuerte en lo ambiental, social y técnico, pero se valora bajo en lo económico. El relleno sanitario se considera muy fuerte en lo financiero, es decir es una alternativa buena por los costos, pero se castiga en lo técnico, ambiental y social
 - La alternativa de Digestión Anaerobia, de acuerdo con el resultado de la investigación se considera muy relevante respecto a las alternativas de valorización energética de residuos, como complemento a la disposición final en relleno sanitario, ya que permiten gestionar los materiales orgánicos (un 50% de los residuos generados) mediante procesos que generan energéticos como el biogás, y abonos para la protección, recuperación y mejoramiento de suelos.

9. REFERENCIAS

- ABRELPE. (2015). *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2015*. Obtenido de http://www.abrelpe.org.br/panorama_apresentacao.cfm
- Acodal - Área Metropolitana del Valle de Aburra. (2013). *Manual de compostaje*. Medellín.
- ACODAL - Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2018). *PGIRS Regional - Plan de monitoreo y seguimiento*.
- ACODAL- Área Metropolitana del Valle de Aburra. (2018). *PGIRS Regional- Proyecciones*. Medellín.
- Allesch, A. H. (2014). Assessment methods for solid waste management: A literature review. *Waste Management & Research*, Vol. 32(6) 461–473.
- Atousa, S., Kasun, H., Bahareh, R., & Rehan, S. (2015). Multiple stakeholders in multi-criteria decision-making in the context of Municipal Solid Waste Management: A review. *Waste Management*, 318-328.
- Babcock & Wilcox. (2019). *Waste to Energy for a Sustainable, Circular Economy*. Obtenido de Babcock & Wilcox: <https://www.babcock.com/en/industry/waste-to-energy>
- Berumen, S. A., & Llamazares Redondo, F. (2007). La utilidad de los métodos de decisión multicriterio (como el AHP) en un entorno de competitividad creciente. *Cuadernos de Administración*, 65-87.
- Bhada-Tata, P., & Hoornweg, D. (2012). *What a waste: A Global Review of Solid Waste Management*. Madrid: World Bank (Urban Development and Local Government Unit).
- Bosmans, A., Vanderreydt, I., Geysen, D., & Helsen, L. (15 de septiembre de 2013). The crucial role of Waste-to-Energy technologies in enhanced landfill mining. *Journal of Cleaner Production*, Volume 55, 10-23.
- Carbonelli Campos, J. M. (2017). Municipal solid waste in Brazil: A review. *Waste Management & Research*.
- Casas Anguita, J., Repullo Labrador, J., & Donado Campos, J. (2003). La encuesta como técnica de investigación. *Atención primaria*, 143 - 162.
- CIWM and WasteAid UK. (Marzo de 2018). *From the land to the sea* . UK: CIWM.
- Confederation of European Waste-to-Energy Plants- CEWEP. (2015). *How much energy does Waste-to-Energy produce? Is it renewable?* Recuperado el 18 de Octubre de 2019, de <http://www.cewep.eu/what-is-waste-to-energy/>
- Confederation of European Waste-to-Energy Plants- CEWEP. (2019). *Interactive Map of Waste-to-Energy Plants*. Obtenido de CEWEP: <http://www.cewep.eu/interactive-map/>
- Corporación Universitaria UNITEC. (2015). *El marco metodológico*. Bogotá.
- Correal, M. (2014). *Desarrollo económico reciente en infraestructuras de residuos sólidos*. Deartamento Nacional de Planeación DNP, Bogotá.

- DANE. (2018). *Proyecciones población desagregación 2018 - 2020*. Bogotá.
- Darley, P. C. (s.f.). *Gasification of Waste*. Obtenido de Peter Brett Associates LLP: <https://www.whatdotheyknow.com/request/195254/response/487012/attach/4/Gasification%20of%20MSW.pdf>
- Decreto 1077 - Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio. (2015). *Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio*. Bogota, Colombia.
- Departamento Nacional de Planeación. (2016). *CONPES 3874, Política Nacional Para la Gestión Integral de Residuos Sólidos*. Bogotá, Colombia.
- Department for Environment, Food & Rural Affairs. (2013). *Advanced Thermal Treatment of Municipal Solid Waste*. United Kingdom.
- Electric Power Research Institute - EPRI. (2011). *Waste-to-Energy Technology - Opportunities for Expanding Renewable Generation & Reducing Carbon Emissions*. EEUU.
- Ellen Macarthur Foundation. (2016). *A circular economy vision for a competitive Europe*. Reino Unido.
- Emvarias. (2018). *Informe de Sostenibilidad*. Medellín.
- Emvarias. (2019). *Informe de sostenibilidad*. Medellín.
- Emvarias. (Enero de 2020). *Tarifas primer semestre de 2020*. Obtenido de https://www.emvarias.com.co/Portals/7/Cientes%20y%20usuarios/servicios%20y%20tarifas/Tarifas%202020/TARIFAS_PRIMER_SEMESTRE_2020.pdf?ver=2020-01-31-145432-393
- ERFO. (s. f.). *The role of SRF in a Circular Economy*. Obtenido de European Recovered Fuel Organization - ERFO: <https://www.erfo.info/>
- ERFO; CEMBREAU. (2015). *Markets for solid recovered fuel. Data and assessments on markets for SRF July 2015*. Bruselas.
- ESWET. (2017). *Everything you always wanted to know about Waste-to-Energy*. Bruselas.
- European Comisión. (2016). *Exploiting the potential of waste to energy under the energy union framework strategy and the circular economy. A Communication from the Commission*. Bruselas.
- Fundación para la Economía Circular. (2014). *Análisis de las tecnologías emergentes de valorización energética*. Madrid.
- Furrer, P., & Walther, R. (2018). *Estudio de factibilidad de una planta WiE para la Región Metropolitana de Chile*. Pöyry - EBP. Santiago: Gobierno Regional Metropolitano.
- Gallardo Izquierdo, A., Edo-Alcón, N., & Vargas Zúñiga, F. A. (2017). El combustible sólido recuperado: Producción y marco regulador. *RETEMA*, 8-16.
- Gottinger, H.-W. (1991). *Economic models and applications of solid waste management*. Amsterdam: B.V. Gordon and Breach Science Publishers.
- Grau, A., & Farré, O. (2011). *Situación y potencial de valorización energética directa de residuos. Estudio Técnico Plan de Energías Renovables PER 2011-2020*. Madrid: Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía - IDAE.

- Graziani, P. (2018). *Economía circular e innovación tecnológica en residuos sólidos: Oportunidades en América Latina*. Buenos Aires: Banco de Desarrollo de América Latina - CAF.
- Güereca, L. P. (2017). Evaluación comparativa de los impactos ambientales de la producción de clínker con combustible fósil frente a combustible derivado de los residuos. *Gaceta del Instituto de Ingeniería de la UNAM*, 16-19.
- Hengevoss, D., Mutz, D., Gross, T., & Hugi, C. (2017). *Waste-to-Energy Options in Municipal Solid Waste Management*. Alemania: GIZ.
- IBGE. (Mayo de 2017). Recuperado el Mayo de 2017, de <http://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/index>.
- INERCO - UPME (2018). *Valorización energética de residuos: Proyecto WtE Colombia*. Bogotá.
- Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA. (2010). *Pagamento por Serviços Ambientais Urbanos Para Gestão dos Resíduos Sólido*. Brasília: IPEA. Obtenido de <http://www.ipea.gov.br/>.
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía - IDAE . (2007). *Biomasa: Digestores anaerobios*. Madrid.
- International Energy Agency - IEA Bioenergy. (2013). *Waste to Energy Summary and Conclusions from the IEA Bioenergy ExCo71 Workshop*. Ciudad del Cabo.
- ISO. (2006). Environmental Management – Life Cycle Assessment – Require-Ments and Guidelines. *Environmental Management – Life Cycle Assessment* –. Geneva: International Standard ISO 14044,.
- Jato-Espino, D., Tejero Monzón, I., Castro-Fresno, D., Temprano, J., & Lobo García, A. (2014). Análisis Multicriterio Integral para optimizar la Gestión de Residuos Sólidos Municipales. Sevilla: Departamento de Transportes y Tecnología de Proyectos y Procesos. Universidad de Cantabria.
- Jimenez, M. M., Cruzate Romero, J., & Naranjo Ibañez, J. (Marzo - Abril de 2017). Impactos ambientales y económico-sociales de la valorización energética de residuos. *RETEMA*.
- Joint Research Centre. (2018). *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Incineration*. Unit European IPPC Bureau. Sevilla: Directorate B – Growth and Innovation. Circular Economy and Industrial Leadership.
- Kamuk, B. H. (2013). *Waste to energy in low an middle income countries*. ISWA, Working Working Group Energy Recovery. Austria: ISWA.
- Kaza , S., & Bhada-Tata, P. (2018). *Decision Maker's Guides for Solid Waste Management Technologies*. Washington, DC: World Bank - Urban Development Series.
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. *Urban Development Series*. Washington, DC: World Bank. Obtenido de <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>
Licencia: CC BY 3.0 IGO
- Koshy, J. (Febrero de 2019). La mitad de las plantas de conversión de residuos en energía de la India desaparecieron. *The Hindu*.

- Koytsoumpa, E. I. (Enero de 2016). The Challenge of Energy Storage in Europe: Focus on Power to Fuel. *Journal of Energy Resources Technology*, 138(4).
- Lamers, F. (2017). Qualification of Alternative Systems for the Thermal Conversion of Municipal Solid Waste. *ReSource - Energy from Waste*, 304-311.
- Lamers, F., Fleck, E., Pelloni, L., & Kamuk, B. (2013). *White Paper on Alternative Waste Conversion Technologies*. Austria: Working Group on Energy Recovery ISWA.
- Larios Bruna, P. (2013). *El mercado del tratamiento de residuos sólidos en India*. Nueva Delhi: ICEX.
- Mark, H., Brandon, T., & Ainhoa, C. (2013). *Guía para la Elaboración de Estrategias Nacionales de Gestión de Residuos*. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente PNUMA - UNITAR.
- Mavropoulos, A. (2016). *Waste menagment for everyone*. Obtenido de Waste Less Future: <https://wastelessfuture.com/>
- Michaels, T., & Krishnan, K. (2018). *2018 Directory of WtE facilities*. Virginia: Energy Recovery Council.
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino de España. (2011). *Mejores Técnicas Disponibles de referencia europea para Incineración de Residuos*. Madrid: Centro de Publicaciones del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2017). Decreto 1784. *Se modifica y adiciona el Decreto 1077 de 2015 en lo relativo con las actividades complementarias de tratamiento y disposición final de residuos, sólidos en el servicio público de aseo*. Bogotá.
- Mohamed, F. (2015). *Evaluación de los impactos ambientales de una incineradora de residuos sólidos urbanos con recuperación de energía mediante el análisis de ciclo de vida*. Málaga: Universidad de Málaga.
- Muñoz, B., & Romana, M. G. (1 de Octubre de 2016). Aplicación de métodos de selección multicriteriodiscretos al análisis de alternativas en estudios informativos de infraestructuras de transporte. *Pensamiento Positivo*, VI(2), 27-46.
- Mutz, D., Hengevoss, D., Hugi, C., & Gross, T. (2017). *Waste-to-Energy Options in Municipal Solid Waste Management*. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. Eschborn: Daniel Hincliffe, Johannes Frommann and Ellen Gunsilius from GIZ.
- National Bourou Statistics of China. (2018). 8-17 Collection, Transpor and Disposal of Consumption wastes China. En *China Statistical Yearbook* (págs. 8-17). China.
- Neuwahl, F. C. (2019). *Documento de referencia de mejores técnicas disponibles (BAT) para incineración de residuos*. Luxemburgo: Oficina de Publicaciones de la Unión Europea.
- Nippon Steel & Sumikin Engineering. (2019). Lista de referencia del sistema de fusión directa. *Plantas en Operación en Japón*.
- Oficina Económica y Comercial de la Embajada de España en Cantón. (2019). *El mercado de la gestión de residuos en China*. Cantón: ICEX España Exportación e Inversiones, E.P.E., M.P.

- Parlamento Europeo y el Consejo. (1999). Directiva 31/CE/1999. . *Relativa al vertido de residuos*. Bruselas.
- Parlamento Europeo; Consejo de la Unión Europea. (2000). DIRECTIVA 2000/76/CE. *Normativa relativa a la incineración de residuos*. Bruselas.
- Parlamento Europeo; Consejo de la Unión Europea. (24 de Noviembre de 2010). Directiva 2010/75/UE. *Sobre las emisiones industriales*. Bruselas, Belgica.
- Pascual , A., Begoña, R., Gómez, P., Flotats, X., & Fernández, B. (2011). *Situación y potencial de generación de biogás. Estudio Técnico PER 2011-2020*. Madrid: IDAE.
- Pérez Partida, H. R. (julio de 2015). *Reflexiones sobre el Presupuesto Base Cero y el Presupuesto basado en Resultados*. Recuperado el 27 de mayo de 2018, de El Cotidiano: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=32539883010>
- Pinasseau, A., Zerger, B., Roth, J., Canova, M., & Roudier, S. (2018). *Best Available Techniques (BAT) Waste treatment Industrial Emissions*. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2018; ISBN 978-92-79-94038-5, doi:10.2760/407967, JRC113018, Joint Research Centre (JRC), Luxemburgo. Obtenido de <https://ec.europa.eu/jrc>
- Ramboll. (2019). *Using waste as a resource*. Obtenido de Ramboll: https://ramboll.com/-/media/files/rgr/documents/markets/energy/waste-to-energy/wte_brochure_most-recent-version-2019.pdf?la=en
- Rand, T., Haukohl, J., & Marxen, U. (2000). *Incineración de residuos sólidos municipales: una guía para la toma de decisiones (inglés)* . Washington, DC:: Banco Mundial - Ramboll.
- Reimann, D. O. (2012). *CEWEP Energy Report III*. Alemania: CEWEP.
- Resolución 909 de 2008 - Por la cual se establecen las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas y se dictan otras disposiciones. (5 de Junio de 2008). *Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial*. Bogotá, Colombia.
- Resolución CRA 720. (9 de julio de 2015). *Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico*. Bogotá, Colombia. Obtenido de Resolución CRA 720.
- Román, P., martinez, M. M., & Pantoja, A. (2013). *Manual de compostaje del agricultor*. Santiago de Chile: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Rosinski, S., Cerezo, L., & O'Connor, D. (2011). *Waste to energy technology: Opportunities for Expanding Renewable Generation & Reducing Carbon Emissions*. EPRI. Palo Alto - California: Electric Power Research Institute.
- Ruiz, F. (2017). *Caracterización de los RSU del relleno sanitario La Pradera*. Medellín: Emvarias.
- Rylander, H. (11 de Abril de 2012). Let's speak about Waste To Energy. (A. Mavropoulos, Entrevistador)
- Saaty, T. L. (2014). *Manual de Software Superdecisión*. Obtenido de Super Decisions CDF: <https://www.superdecisions.com/>
- Saaty, T. L., & Katz, J. M. (1990). How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research* 48, 9-26.

- Savino, A., Zolorzano, G., Quispe, C., & Correal, M. L. (2018). *Perspectiva de la Gestión de Residuos en América Latina y el Caribe*. Ciudad de Panamá: ONU Medioambiente.
- Secretaría de Gestión y Control Territorial - Secretaria de Medio Ambiente. (2016). *Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos-PGIRS - Municipio de Medellín - 2016 - 2027*. Medellín.
- Secretaria de Gestión y Control Territorial. (2019). *Informe de la caracterización de residuos sólidos generados en el sector residencial del área urbana y rural del Municipio de Medellín y sus cinco corregimientos*. Medellín: Consorcio Residuos Sólidos Medellín.
- Sepulveda Villada, L. A., Gómez Sepulveda, P., Acosta Velasquez, J. J., & Díaz, L. F. (2018). *Manual del Usuario Sistemas Autonomos Earthgreen Colombia SAC*. Medellín.
- SSPD - DNP - Ap. (2016). *Informe Nacional de Aprovechamiento*. Bogotá.
- SSPD - DNP - DF. (2016). *Informe Nacional de Disposición Final*. Bogotá.
- Stengler, E. (2017). Communicating WtE's role. *Boletín Recycling & waste world*.
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2019). *Informe de Disposición Final de Residuos Sólidos – 2018*. Bogotá D-C.
- Tangri, N., & Wilson, M. (2017). *Waste Gasification & Pyrolysis: High Risk, Low Yield Processes for Waste Management*. GAIA.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, S. A. (1994). *Gestión integral de residuos sólidos*. España: McGraw-Hill.
- The European Parliament and the Council. (2008). Directive 2008/98/EC. *Waste and repealing certain directives*. Bruselas.
- The European Parliament and the Council. (2011). Directive 2011/92/UE. . *Assessment of the effects of certain public and private projects on the environment*. Brussels, Belgica.
- Themelis, N. J., Diaz Barriga, M. E., Estevez, P., & Gaviota Velasco, M. (2013). *Guía para la recuperación de energía y materiales de residuos*. Columbia University. New York: Earth Engineering Center.
- U.S. Energy Information Administration. (2019). *Inventory of Operating Generators*.
- United Nations Environment Programme. (2015). *Global Waste Management Outlook*.
- United Nations Environment Programme. (2019). *Waste-to-Energy: Considerations for Informed Decision-Making*. Osaka.
- Velasco, A. A., & Sánchez, J. (2012). *Estudio de viabilidad para fabricación de combustible sólido recuperado de residuos urbanos procedentes de plantas de plantas TMB*. Vitoria-Gasteiz: CONAMA10.
- Waldheim, Lars ; Waldheim Consulting. (2018). *Gasification of waste for energy carriers*. IEA Bioenergy.
- Whiteman, A., K Gupta, S., Briciu, C., & Bates, S. (2016). *Waste to Energy Rapid Assessment Tool, Collaborative Working Group on Solid Waste Management in Low and Middle Income Countries*. St.Gallen - Suiza. Obtenido de <http://www.cwgnet.net/>.

- Wilson, D. C., Rodic, L., Cowing, M. J., Velis, C. A., Whiteman, A. D., Scheinber, A., . . . Oelz, B. (2015). Benchmark Indicators for Integrated Sustainable Waste Management in Cities. *Waste Management*, 329-342.
- Yaque Sánchez, A., & Ollero de Castro, P. (2013). *Combustibles sólidos recuperados (CSR - SRF) y combustibles derivados de residuos (CDR – RDF)*. Sevilla: Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla.
- ZKG International. (Septiembre de 2014). *Combustibles sólidos recuperados - Especificaciones y clases*. Obtenido de ZKG International: https://www.zkg.de/en/artikel/zkg_Solid_Recovered_Fuels_Specifications_and_classes_2067874.html