



SELECCIÓN DE UNA ALTERNATIVA
VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE RESIDUOS
SÓLIDOS PARA LA CIUDAD DE BOGOTÁ,
UTILIZANDO EL ANÁLISIS JERÁRQUICO
MULTICRITERIO (AHP)

Angélica María Perilla Morales – David Alejandro Pongutá Cordero

Universidad EAN
Facultad de Ingeniería
Maestría en Proyectos de Desarrollo Sostenible
Bogotá – Colombia
2020

Selección de una alternativa de valorización energética de residuos sólidos para la ciudad de Bogotá, utilizando el Análisis Jerárquico Multicriterio (AHP)

Angélica María Perilla Morales – David Alejandro Pongutá Cordero

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

Magister en proyectos de desarrollo sostenible

Directora
Phd. Luz Maribel Guevara

Modalidad
Monografía

Universidad EAN
Facultad de Ingeniería
Maestría en Proyectos de Desarrollo Sostenible
Bogotá, Colombia
2020

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Firma del director del trabajo de grado

Bogotá D.C. ____ - ____ - ____
dd - mm - aaaa

DEDICATORIA

Angelica:

A mi familia y a las personas que me brindaron su apoyo y soporte durante este proceso.

David:

Al único que me dio la fuerza para continuar cuando ya no quería escribir ni leer, al único Dios que existe y su hijo Jesús.

AGRADECIMIENTOS

Angelica:

Gracias a mi familia y amigos

David:

A Papá y Mama, todo escalón que suba en mi vida es impulsado por lo que ustedes han hecho por mí.

Hermanas, a su ánimo, amor, risas.

Paula, tu amor, tu paciencia y tu perdón me fortalecieron en este camino.

A Maat, sin su experiencia, datos y su inyección de pasión por trabajar por hacer de este planeta un lugar mejor.

A mi compañera de trabajo, Angelica, sus capacidades hicieron de este trabajo algo que solo no hubiera podido hacer.

Agradecimiento especial

A los profesionales que desinteresadamente participaron en el estudio, Claudia Lorena Suarez Marmolejo, María Cristina Rodríguez Villera, Enrique Edgardo Guilles Romero, Jorge Arturo Calderas Winder Carlos Andrés Forero Rodríguez, Eduar Jovan Mendoza Acevedo, Mario Andrés Hernández Pardo, William Alarcón y Yaniro Gabriel Medina Moncayo

RESUMEN

La generación de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en la ciudad de Bogotá evidencia un crecimiento sostenido durante las dos últimas décadas, estudios locales refieren que este aumento se encuentra directamente relacionado con el crecimiento poblacional de la ciudad, por lo tanto, en el futuro próximo la expectativa es continuar observando incrementos en la generación de RSU. Este escenario se configura en uno complejo para la ciudad debido a su capacidad limitada en la gestión de los residuos, el Observatorio Ambiental de Bogotá (2020) señala que se arrojan 5.724 toneladas diarias, en el único relleno sanitario de la ciudad y la única alternativa actual de disposición de RSU, Doña Juana, lugar que cuenta con licencia ambiental vigente hasta 2023 (Díaz, 2018). Tal problemática conlleva a resaltar la necesidad de repensar la gestión de los residuos sólidos de la ciudad en el marco de una gestión integral abordando la jerarquía de la gestión integral de residuos sólidos que contempla la prevención, la reutilización, el reciclado, la valorización y finalmente la disposición.

Esta investigación exploró la posibilidad de plantear una alternativa teórica de valorización energética de residuos sólidos para la ciudad de Bogotá, a partir de; el establecimiento de un marco teórico sobre las alternativas de valorización energética de residuos comúnmente utilizada, la caracterización de los RSU en la ciudad de Bogotá y el establecimiento de su potencial energético, la identificación del marco legal aplicable para proyectos de generación de energía por medio de RSU y la implementación de un modelo de análisis jerárquico multicriterio que apoya la toma de decisión. Se encontró que la alternativa de incineración es la que registra el peso ponderado más significativo como resultado del análisis jerárquico multicriterio que consideró aspectos relativos a temas técnicos, económicos, ambientales y sociales para así basar la toma de decisión en un contexto de sostenibilidad.

Se plantea como propuesta vincular al esquema actual de gestión de residuos sólidos de la ciudad, la puesta en marcha de la incineración de RSU como tecnología de valorización energética que complemente el esquema de manejo de los residuos bajo la jerarquía de gestión integral de residuos para así enfrentar uno de los principales desafíos presentes en la ciudad, refiriendo además algunas perspectivas actuales que soportarían el proceso en el marco del apoyo y la experiencia internacional al respecto, la seguridad de contar con suministro de RSU valorizables energéticamente, el

fortalecimiento de modelos económicos que contribuyen a la economía circular y la existencia de incentivos tributarios.

Palabras clave: Valorización energética de residuos, incineración, pirolisis, gasificación, digestión anaeróbica, residuos sólidos urbanos, RSU

ABSTRACT

The generation of Solid Urban Waste (MSW) in Bogotá shows a sustained growth during the last two decades, local studies refers that this increase is causally related with the population growth, therefore, soon the expectation is to continue observing increases in the generation of MSW. This scenario is complex for the city due to its limited capacity in waste management, the (Observatorio Ambiental de Bogotá, 2020) indicates that 5,724 tons are dumped per day, in the Doña Juana landfill, the only current alternative of MSW disposal, this place has an environmental license, but the permit is only until 2023 (Díaz, 2018). So is necessary rethink the solid waste management of the city within the framework of comprehensive management, addressing the hierarchy of comprehensive solid waste management that includes prevention, reuse, recycling, recovery and finally the disposition.

This research explore the possibility of proposing the most sustainable alternative for the energy recovery of solid waste for the city of Bogotá, based on; the establishment of a theoretical framework about the alternatives of energy recovery, the characterization of the MSW in the city of Bogotá and the establishment of its energy potential, the identification of the applicable legal framework for projects of power generation through MSW and the implementation of a multi-criteria hierarchical analysis model that supports decision-making. It was finding that the most sustainable alternative is incineration, this being the one that registers the most significant weighted weight because of the multi-criteria hierarchical analysis that considered aspects related to technical, economic, environmental, and social issues to base decision making supported in a context of sustainability.

The proposal of the investigation is to link in the current solid waste management scheme of the city, the start-up of the incineration of MSW as a sustainable energy recovery technology that complements the waste management scheme under the hierarchy of comprehensive waste management. In this way, it will be possible to face one of the main challenges present in the city, also referring to some current perspectives that would support the process in the framework of international support and experience, the security of having a supply of energetically valuable MSW, the strengthening of models economic to strengthen the circular economy and the existence of tax incentives.

Keywords: Energy recovery from waste, waste-to-energy, incineration, pyrolysis, gasification, anaerobic digestion, solid waste

TABLA DE CONTENIDO

CAPITULO 1	1
1.1. Introducción	1
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo General.....	3
1.2.2. Objetivos Específicos	3
1.3. Justificación.....	4
1.4. Supuesto	6
CAPITULO 2 – MARCO TEÓRICO	7
2.1. Gestión integral de residuos Sólidos.....	7
2.2. Situación actual y esquema de gestión de RSU en Bogotá	12
2.3. Valorización energética de RSU	18
2.3.1. Definición.....	20
2.3.2. Costos asociados a las tecnologías de valorización energética de residuos.....	22
2.3.3. Incineración	25
2.3.4. Pirolisis	26
2.3.5. Gasificación.....	29
2.3.6. Digestión Anaeróbica.....	30
2.4. Marco Jurídico	33
2.5. El análisis multicriterio como soporte para la toma de decisiones.....	43
CAPITULO 3 – METODOLOGÍA	48
3.1. Describir alternativas valorización energética de residuos sólidos	48
3.2. Recabar información en relación con los RSU de la ciudad de Bogotá.....	50
3.3. Seleccionar una alternativa de valorización energética para el manejo de los RSU en la ciudad de Bogotá	52
3.3.1. Definición del problema	53
3.3.2. Definición de criterios	53
3.3.3. Identificación de alternativas.....	53
3.3.4. Evaluación de alternativas	54
3.4. Análisis de resultados.....	58

3.5. Selección de alternativa.....	59
CAPITULO 4 – DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	60
4.1. Descripción de alternativas de valorización energética de RSU.....	60
4.2. Residuos Sólidos Urbanos de la ciudad de Bogotá.....	74
4.3. Normatividad aplicable a la gestión de RSU por medio de alternativas de valorización energética de RSU	86
4.4. Selección de una alternativa de valorización energética de residuos sólidos para la ciudad de Bogotá implementando el método multicriterio de análisis jerárquico AHP... ..	87
4.4.1. Definición del problema	87
4.4.2. Definición de criterios	88
4.4.3. Identificación de alternativas.....	91
4.4.4. Evaluación de alternativas	92
4.4.5. Selección de alternativa.....	110
CAPITULO 5 - PROPUESTA	114
5.1. Impacto social - Empleo.....	118
5.2. Apoyo y experiencia internacional	120
5.3. Garantía de suministro de RSU valorizable energéticamente	120
5.4. Valorización energética de residuos como parte de la economía circular	121
5.5. Incentivos tributarios.....	122
CAPITULO 6 – CONCLUSIONES	124
CAPITULO 7– RECOMENDACIONES.....	127
REFERENCIAS	128

Índice de tablas

Tabla 1. Operadores de aseo Bogotá	13
Tabla 2. Composición macroscópica de residuos Bogotá 2017	17
Tabla 3. Características fisicoquímicas de los residuos sólidos	18
Tabla 4. Componentes químicos y poder calorífico de la masa degradable (orgánicos) de los residuos sólidos residenciales y comerciales	18
Tabla 5. Distribución de los costos de capital para proyectos térmicos de valorización energética de residuos.....	23
Tabla 6. Distribución de los costos de capital para proyectos DA de valorización energética de residuos.....	23
Tabla 7. Datos estimados de inversión por capacidad de procesamiento	25
Tabla 8. Composición fracción sólida obtenida en la pirolisis de RSU	28
Tabla 9. Composición del gas obtenido en la pirolisis de RSU.....	28
Tabla 10. Composición de biogás según el residuo utilizado	31
Tabla 11. Normatividad aplicable a posibles proyectos de valoración energética.	34
Tabla 12. Escala fundamental de números absolutos	47
Tabla 13. Parámetros de revisión de información secundaria disponible	49
Tabla 14. Descripción de alternativas de valorización energética de RSU	50
Tabla 15. Ejemplo de la importancia de los criterios	55
Tabla 16. Escala de Saaty	56
Tabla 17. Ejemplo de comparación de subcriterios con respecto a criterio 1	56
Tabla 18. Ejemplo de comparación de subcriterios con respecto a criterio 2	56
Tabla 19. Ejemplo de comparación de subcriterios con respecto a criterio 3	57
Tabla 20. Ejemplo de comparación de subcriterios con respecto a alternativa 1.....	57
Tabla 21. Ejemplo de comparación de subcriterios con respecto a alternativa 2.....	57
Tabla 22. Ejemplo de comparación de subcriterios con respecto a alternativa 3.....	57
Tabla 23. Índices IA	59
Tabla 24. Relación de referencias consultadas para la investigación.....	62
Tabla 25. Aspectos descriptivos asociados a la alternativa de incineración	70
Tabla 26. Aspectos descriptivos asociados a la alternativa de gasificación	71
Tabla 27. Aspectos descriptivos asociados a la alternativa de pirolisis	72
Tabla 28. Aspectos descriptivos asociados a la alternativa de digestión anaeróbica	73
Tabla 29. Población total, residuos generados y generación de residuos per cápita para la ciudad de Bogotá. 2005-2020	76

Tabla 30. Caracterización de los RSU generados en Bogotá, actualizada de acuerdo con las proyecciones de generación (2011-2018)	78
Tabla 31. Estimación de Toneladas de RSU anuales por categoría. 2019 – 2030	81
Tabla 32. Composición fisicoquímica de los RSU degradables.....	83
Tabla 33. Poder Calorífico superior e inferior de los RSU degradables para Bogotá	84
Tabla 34. Priorización de criterios considerados para la toma de decisión.....	97
Tabla 35. Matriz de priorización de alternativas en consideración de los criterios y subcriterios vinculados en la toma de decisión	105
Tabla 36. Consideraciones técnicas, ambientales, sociales y económicas para la implementación de la incineración de RSU en la ciudad de Bogotá.....	115
Tabla 37. Personal empleado CGRDJ 2016	118
Tabla 38. Requerimiento estimado de personas para operar una planta de incineración	119
Tabla 39. Empleo en los segmentos de relleno sanitario e incineración Francia 2009...	120

Índice de gráficos

Gráfico 1. Etapas de madurez comercial de las tecnologías de valorización energética de residuos.....	22
Gráfico 2. Comparación de los costos de capital por capacidad instalada en proyectos de valorización energética de residuos.....	24
Gráfico 3. Relación de tipo de documentos revisados.....	61
Gráfico 4. Gráfico de dispersión Residuos Totales Vs Población Total.....	75
Gráfico 5. Residuos generados entre 2005 – 2018, generación de residuos estimada entre 2019 -2020, para la ciudad de Bogotá.....	77
Gráfico 6. Cantidad RSU generados en Bogotá por tipo de residuos, entre los años 2011 y 2018.....	79
Gráfico 7. Cantidad de RSU valorizables energéticamente y su contenido energético (2019-2030).....	85
Gráfico 8. Análisis de normatividad aplicable a los posibles proyectos de valorización energética de residuos.....	86
Gráfico 9. Prioridad Global de Criterios.....	98
Gráfico 10. Priorización consolidada de los subcriterios relacionados con el criterio de aspectos Técnicos.....	99
Gráfico 11. Priorización consolidada de los subcriterios relacionados con el criterio Dimensión Ambiental.....	100
Gráfico 12. Priorización consolidada de los subcriterios relacionados con el criterio Dimensión Económica.....	101
Gráfico 13. Priorización consolidada de los subcriterios relacionados con el criterio Dimensión Social.....	102
Gráfico 14. Priorización Global para la toma de decisión sobre una alternativa de valorización energética de RSU para la ciudad de Bogotá.....	103
Gráfico 15. Priorización de alternativas en consideración de los subcriterios asociados al criterio Aspectos Técnicos.....	106
Gráfico 16. Priorización de alternativas en consideración de los subcriterios asociados al criterio Dimensión Ambiental.....	108
Gráfico 17. Priorización de alternativas en consideración de los subcriterios asociados al criterio Dimensión Económica.....	109

Gráfico 18. Priorización de alternativas en consideración de los subcriterios asociados al criterio Dimensión Social	110
Gráfico 19. Priorización de alternativas en consideración de los subcriterios asociados al criterio Dimensión Social	111

Índice de diagramas

Diagrama 1. Marco de la gestión sostenible integral de residuos sólidos.....	10
Diagrama 2. Jerarquía en la gestión integral de residuos.	11
Diagrama 3. Marco analítico de los dos triángulos.....	12
Diagrama 4. Principios de la economía circular.	19
Diagrama 5. Procesos de valorización energética de residuos	20
Diagrama 6. La jerarquía de residuos y los procesos de valorización energética de residuos.....	21
Diagrama 7. Esquema básico proceso de incineración de residuos.....	25
Diagrama 8. Esquema básico pirolisis	27
Diagrama 9. Esquema básico gasificación.....	29
Diagrama 10. Esquema proceso de biodigestión anaerobia	32
Diagrama 11. Procedimiento para desarrollar el análisis multicriterio	53
Diagrama 12. Esquema Jerárquico.....	54
Diagrama 13. Esquema Jerárquico para la toma de decisión	92
Diagrama 14. Esquema Jerárquico con resultados de AHP para la toma de decisión ...	112
Diagrama 15. Tipologías de iniciativas innovadoras de la economía circular	122

Índice de imágenes

Imagen 1. Contenedores instalados en Bogotá.....	14
--	----

CAPITULO 1

1.1. Introducción

La investigación que se desarrolla es inherente a la Gestión Ambiental y a la línea de investigación relacionada con la gestión de recursos naturales y energía, por medio de esta se espera determinar una alternativa de valorización energética de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) para la ciudad de Bogotá.

En la ciudad de Bogotá se pronostican tasas de crecimiento poblacional positivas, de acuerdo con Crisancho y Triana (2018), en 2030 habitarán 11.089.133 personas y este número en 2050 se incrementará a 13.047.051 distribuidas en 3.426.623 y 4.919.004 hogares respectivamente, bajo este escenario se prevé el incremento en la generación de residuos por parte de la población que habita en la ciudad producto de sus actividades sociales, familiares, económicas y culturales. DNP indica, en la medida en que la población aumenta, se incrementa la generación de residuos y en su informe sobre la disposición final de residuos sólidos del año 2017, refiere que el crecimiento en la disposición final de residuos será de 10% coincidiendo con lo proyectado por Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) respecto al aumento de población entre 2010 y 2017 (Superintendencia de Servicios Públicos & DNP, 2018).

Actualmente Bogotá enfrenta dificultades en relación con el manejo de los residuos sólidos, en 3 años la ciudad dejará de contar con un relleno sanitario adecuado para gestionar los residuos, debido a la tendencia creciente de generación de basuras en la ciudad, solamente hay una zona legal y adecuada para la gestión y disposición que además de recibir los residuos de la capital recibe los generados en 6 municipios más.

Bajo el contexto anterior resulta fundamental aunar esfuerzos en Bogotá para considerar un enfoque preventivo contemplando la minimización de residuos basado en el consumo sostenible, además de plantear alternativas que además de proyectar el rehúso de ciertos materiales, promuevan el aprovechamiento de los mismos para la generación insumos requeridos en procesos productivos y en las actividades habituales de la población, llevando a disminuir ciertas presiones ejercidas sobre el medio ambiente causadas por la necesidad de satisfacer las demandas de los habitantes.

“..., es importante no solo migrar a disposición final en rellenos sanitarios adecuados técnica y ambientalmente, sino ir un paso más allá y migrar a otras tecnologías más aceptables y sostenibles que van desde la minimización, el reúso, la separación en la

fuentes y el aprovechamiento de los residuos sólidos hasta la implementación de otro tipo de alternativas tecnológicas (e.g. incineración de residuos para la obtención de energía) que puedan presentar múltiples y mayores beneficios comparados con los rellenos sanitarios.” (Superintendencia de Servicios Públicos & DNP, 2018, pág. 54)

La posibilidad de implementar procesos que aprovechen energéticamente los RSU contribuiría a reducir el volumen de desperdicios dispuestos finalmente en el Relleno Sanitario del Distrito, y aportará fuentes alternativas de energía a la matriz energética disminuyendo entonces la presión actualmente ejercida sobre el medio ambiente en términos del uso de fuentes hídricas o recursos fósiles.

El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente en su guía para la toma informada de decisiones sobre valorización energética de residuos (2019) hace claridad que este tipo de tecnologías son las de mayor aplicación en países desarrollados y son las que se están adoptando con más fuerza a nivel mundial, sin dejar de lado las estrategias de prevención, reutilización y reciclaje. Además, la recuperación energética es uno de los pasos previos a la disposición según la jerarquía de gestión de residuos (El Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea, 2008) que se ha adoptado en las políticas públicas a nivel mundial y hace parte de las políticas públicas a nivel local.

Basado en lo anteriormente referido es pertinente preguntarse acerca de la posibilidad de aprovechar energéticamente los RSU producidos en la ciudad de Bogotá, vinculando los aspectos técnicos, económicos, sociales y ambientales que podrían viabilizar esta opción en el marco de la sostenibilidad. Con el objeto de atender tal cuestión se desarrolla este trabajo de monografía considerando en primer lugar un marco de referencia que contextualiza lo correspondiente a, la gestión integral de los RSU, la situación actual del manejo de este tipo de residuos en la ciudad de Bogotá, las posibilidades de valorización energética, el análisis multicriterio como soporte en la toma de decisiones complejas y finalmente el marco normativo existente en relación con la posibilidad de implementar tecnologías de valorización energética. En segundo lugar, se aborda la descripción de la metodología mixta a implementar para atender los objetivos planteados, para posteriormente en la siguiente sección desarrollarla, presentar los resultados obtenidos y plantear una propuesta general al respecto.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Seleccionar una alternativa de valorización energética de residuos sólidos para la ciudad de Bogotá por medio del análisis jerárquico multicriterio (AHP)

1.2.2. Objetivos Específicos

- Elaborar marco teórico sobre alternativas valorización energética de residuos sólidos, en consideración de los aspectos relativos a procesamiento, tipo de residuos que transforma, costos de capital y de operación y mantenimiento, emisiones atmosféricas, capacidad para reducir el volumen de los RSU, tipo de energía que produce, necesidades de preprocesamiento y eficiencia de la tecnología.
- Recabar información en relación con los RSU de la ciudad de Bogotá, y establecer su potencial para la generación de energía, a partir de información secundaria disponible.
- Identificar el marco legal y las regulaciones nacionales vigentes para proyectos de generación de energía a partir de RSU.
- Definir una alternativa teórica de valorización para el manejo de los RSU en la ciudad de Bogotá, con base en el desarrollo de un proceso análisis jerárquico multicriterio (AHP).

1.3. Justificación

El esquema de aseo actual en Bogotá está compuesto por 5 operadores que recolectan los residuos en 5 diferentes zonas de la ciudad, llamadas áreas de servicio exclusivo (ASE), además de atender más de 10.000 contenedores urbanos ubicados en 15 localidades (Estupiñán, 2018), cuyo objetivo es darle al ciudadano un lugar donde ubicar sus residuos sin afectar el espacio público. Entre los contenedores ubicados hay unos para material aprovechable que son revisados y evacuados por recicladores de oficio y los de no aprovechables son vaciados regularmente por camiones compactadores de carga lateral. En este esquema se han vinculado recicladores de oficio encargados de recolectar los residuos aprovechables de las casas que reciclan o de recuperar los disponibles en dichos contenedores, pero aun así la tasa de recuperación es entre el 14% y el 15% de las 6.300 toneladas de residuos que se producen a diario en la ciudad (Semana, 2020). De esta fracción se encuentran residuos que no pueden aprovecharse, 5.386 toneladas aproximadamente son llevadas al relleno sanitario Doña Juana a diario, tal relleno desde el inicio de su operación el 1 de noviembre de 1988 pronosticó un tiempo de uso de 30 años, así que se estimaba su cierre para el año 2018, aunque estudios de la UAESP afirman que su ocupación final sería para el 2022 (UAESP, 2018, pág. 47) no obstante, el proyecto inicial ha sido modificado, ampliando el área de disposición y modificando su licencia ambiental, como la aprobada en 2014 con la resolución 1351 de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), y que en su artículo 23 obliga a UAESP a hacer estudios para definir nuevas áreas potenciales para la disposición de residuos sólidos y la no ampliación u optimización del RSDJ (Resolución CAR 1351, 2014) y aun así la UAESP realizó estudios técnicos para optimizar su capacidad a aproximadamente 80 millones de toneladas, ampliando su vida útil hasta 2053, es decir 30 años más (UAESP, 2018, pág. 60).

Durante los 32 años de operación conforme se va llenando de residuos, también se va llenando de incumplimientos ambientales, ya que se han presentado derrumbes de residuos, como el ocurrido en 1997, emisión dióxido de carbono, el metano y el ácido sulfídico, producidos por la metanogénesis, los cuales son descargados a la atmósfera, generación vectores (moscas y roedores) y lixiviados vertidos en fuentes hídricas (Molano Camargo, 2019) y (Ramos Gutierrez, 2020).

Adicional a lo anterior, tal como lo refiere el DANE y Planeación Nacional, la población en la ciudad se encuentra en constante incremento, aproximadamente un 8.3% anual por

los próximos 30 años (DANE, 2020), no sólo de tipo natural, sino también asociado a procesos migratorios significativos, de manera tal que, resulta evidente que con el paso del tiempo la generación de residuos será incremental, pues cada actividad que realizan las personas siempre va a producirlos y el porcentaje recuperación de residuos potencialmente aprovechables, como se nombró anteriormente, no avanza.

Como respuesta a los inconvenientes presentados en el relleno, al imparable crecimiento poblacional de la ciudad y al no ver iniciativas en curso que den solución a pesar de la cantidad de externalidades negativas que se presentan, es pertinente plantear el uso de alternativas para el manejo de los residuos sólidos producidos en la ciudad, buscando una gestión equilibrada entre lo ambiental, social, económico y técnico, y para esto, se abre la puerta a las tecnologías de valorización energética de residuos, tanto alternativas térmicas como biológicas, que se configuran en una opción que permite brindar mejoras a la gestión de los residuos en cada una de sus fracciones, tanto en la orgánica como en la no aprovechable, en términos sociales y ambientales en la ciudad a partir de su aprovechamiento, reintroduciéndolos al sistema productivo y por ende reduciendo la cantidad de desperdicios que terminan destinándose a la disposición en el relleno sanitario además de generar valor y crecimiento económico en relación con un recurso (residuos) desestimado hasta ahora (Martínez, J., Montoya, N., y Sierra, M, 2014), tales alternativas cuentan con sistemas avanzados para minimizar la aparición de impactos ambientales adversos logrando un tratamiento óptimo de emisiones e incluso llevando a que sus subproductos (líquidas, sólidas y gaseosas) sean reutilizados en actividades como la agricultura y la construcción. Tener en consideración estas alternativas además de aliviar la presión sobre el relleno sanitario Doña Juana contribuye con la generación de energía eléctrica por medio de Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER) posiblemente transable para soportar el Sistema Interconectado Nacional (SIN), esto resulta interesante, al brindar opciones a la sociedad en la vía de procurar la existencia de un ambiente más sano, la reducción del uso de recursos naturales y la posibilidad de generar empleos en campos innovadores.

Con base en lo anterior en esta investigación se evaluarán algunas de estas tecnologías, tanto térmicas como biológicas, de valoración energética de residuos sólidos para la ciudad de Bogotá y su resultado se configurará en un insumo más que contribuirá a la toma de decisiones en el momento que desde lo público o lo privado se consideren opciones que pretendan mejorar la gestión de los RSU.

1.4. Supuesto

El análisis jerárquico multicriterio permitiría la identificación de la alternativa de valorización energética de residuos sólidos urbanos más adecuada para la ciudad de Bogotá.

CAPITULO 2 – MARCO TEÓRICO

2.1. Gestión integral de residuos Sólidos

Revisado desde varios enfoques, la gestión integral de residuos sólidos (GIRS) es una interacción de tecnologías, mecanismos, técnicas y programas para configurarse en un mecanismo a favor de las necesidades de la comunidad. La Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental de México la define como, la combinación de flujos de residuos, métodos de recolección y procesamiento que benefician el medio ambiente, optimizan los recursos económicos y goza de aceptación social. Dentro de este esquema se tienen en cuenta opciones de manejo que incluyen iniciativas para fomentar el reúso y el reciclaje, sistemas de tratamiento como la biodigestión o sistemas de valorización energética de residuos, incluyendo sitios de disposición final como los rellenos sanitarios. Todo esto hace parte de una estrategia que responde a las necesidades y contextos locales (SEMARNAT, 1999, pág. 17).

Para la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) la gestión integrada de residuos sólidos comprende programas de prevención, reciclaje, compostaje, y disposición final. Para lograr una gestión efectiva se debe considerar como prevenir la generación, como reciclar y cómo manejar los residuos de tal forma que, se proteja la salud humana y el cuidado del ambiente (EPA, 2002).

La Asociación Internacional de Residuos Sólidos (ISWA por su nombre en inglés), utiliza el concepto de Gestión Integrada Sostenible de Residuos Sólidos (ISWM por sus siglas en inglés), y se diferencia del enfoque convencional de la gestión integral de residuos al vincular la participación de los grupos de interés, cubrir la prevención en la generación residuos y enfocarse en la recuperación de recursos, esta interactúa con otros sistemas y promueve la integración de diferentes escalas de hábitat (ciudades, barrios, hogares). ISWM no se ocupa de la gestión de residuos solo como un problema técnico, sino que también reconoce el factor político y social como uno importante (ISWA, 2012).

El Programa Ambiental de las Naciones Unidas (UNEP por sus siglas en inglés), propone adoptar un enfoque integral en todos los tipos de flujos de residuos sólidos vinculando el uso de una variedad de alternativas de manejo. Este sistema debe comprender desde la generación hasta la disposición, acompañado de otros pasos o

etapas que abarcan todos los tipos de residuos. Un sistema óptimo de ISWM está acompañado de una selección de tecnologías sostenibles y adecuadas, considerando los aspectos económico y social para construir un sistema de gestión de residuos sostenible (UNEP, 2009).

En Colombia el decreto 1713 de 2002 entregaba una definición de gestión integral de residuos sólidos como “el conjunto de operaciones y disposiciones encaminadas a dar a los residuos producidos el destino más adecuado desde el punto de vista ambiental, de acuerdo con sus características, volumen, procedencia, costos, tratamiento, posibilidades de recuperación, aprovechamiento, comercialización y disposición final” (Decreto 1713, 2002) en esta definición se contemplaba únicamente dar un destino adecuado ambientalmente sin tener en cuenta algún tratamiento previo o actividad encaminada a la reducción de estos. Este decreto fue derogado por el decreto 2981 de 2013, el cual reglamenta la prestación del servicio público de aseo y actualiza algunas definiciones como la gestión integral de residuos sólidos y cambia a “es el conjunto de actividades encaminadas a reducir la generación de residuos, a realizar el aprovechamiento teniendo en cuenta sus características, volumen, procedencia, costos, tratamiento con fines de valorización energética, posibilidades de aprovechamiento y comercialización. También incluye el tratamiento y disposición final de los residuos no aprovechables” (Decreto 2981, 2013). Estas definiciones, que hacen parte del marco normativo, son incluidas dentro de las políticas que han venido evolucionando desde la Política para la Gestión de Residuos Sólidos emitida en el año 1998 por el ministerio del medio ambiente hasta el CONPES 3874 del 2016, Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos, el cual fomenta la economía circular, el desarrollo sostenible y la adaptación y mitigación al cambio climático (CONPES 3874, 2016), conceptos que en 1997 no estaban disponibles.

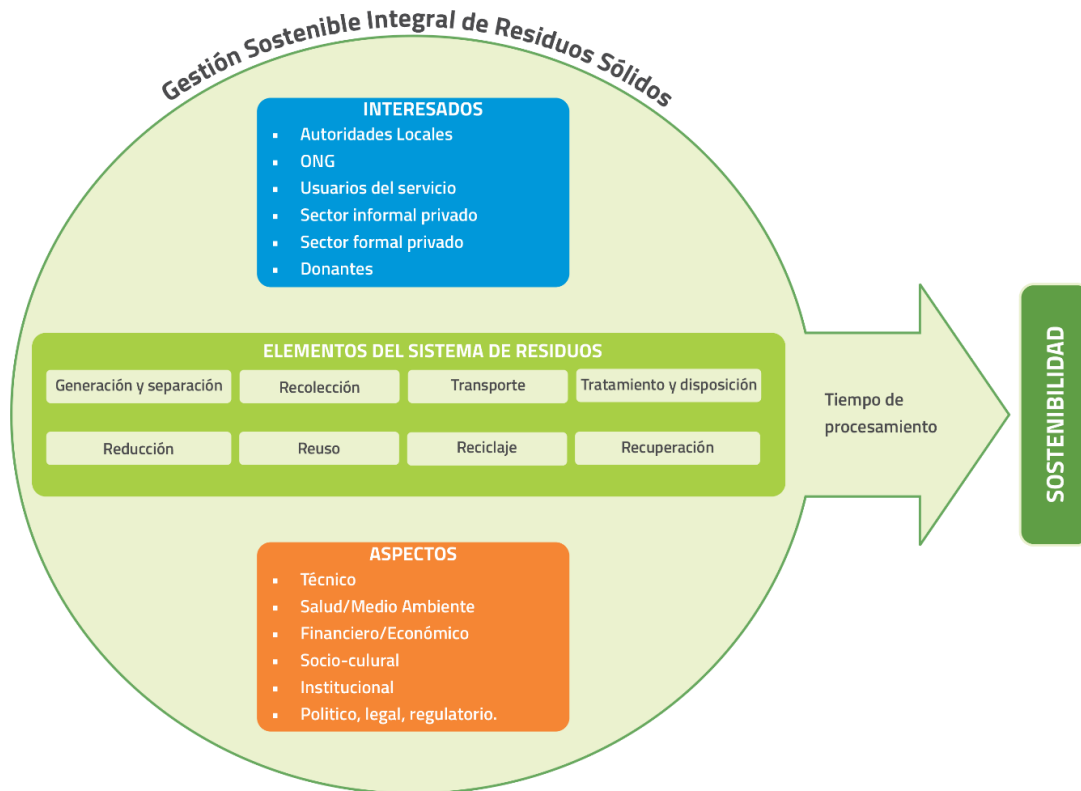
Estas definiciones abordan la Gestión Integral de Residuos Sólidos (GIRS) como un sistema interconectado adaptable a las necesidades de la región donde se desarrolle; por ejemplo, una ciudad puede tener un sistema que cuente con estaciones de separación, incineración con recuperación de energía y relleno sanitario y esta puede ser muy diferente al sistema en otra ciudad que incluya reciclado, composta y relleno sanitario. Además, se deben analizar los aspectos técnicos y no técnicos conjuntamente, los desarrollos o problemas en una de las áreas, afecta las prácticas y la operatividad en otra (UNEP, 2005). Según Semarnat “el objetivo principal del manejo integral de los residuos

sólidos, es encontrar los medios económicos y ambientales más apropiados para desviar una cantidad óptima de residuos del relleno sanitario” (SEMARNAT, 1999, pág. 17).

La Gestión Integrada Sostenible de Residuos Sólidos identifica tres dimensiones respondiendo a tres preguntas claves y están estructurados según el Diagrama 1:

1. ¿Quién necesita estar involucrado? Para responder esta pregunta se piensa en las partes involucradas y beneficiadas; los usuarios generadores, ya sean de origen industrial, doméstico o institucionales; las autoridades locales y nacionales, así como los operadores del esquema de aseo. También los recicladores de oficio, recolectores de los residuos, y las familias que rodean los sitios de tratamiento o de disposición final.
2. ¿Qué se debe hacer? Es el componente técnico del sistema. Este marco de referencia para el diseño de un sistema de gestión integral y sostenible de residuos, no se enfoca únicamente en lo técnico, por el contrario, es apenas una parte de un todo. En el Diagrama 1, las cajas de la fila superior se refieren a la eliminación y disposición segura, y las cajas de la fila inferior se refiere a la "valorización" de los productos básicos. La gestión de residuos sólidos consta de una variedad de actividades, incluida la reducción, la reutilización, el reciclaje y el compostaje, operadas por una variedad de partes interesadas en diversas escalas.
3. ¿Cómo lograr los resultados deseados? Un sistema de gestión de residuos sostenible considera todos los aspectos operativos, financieros, sociales, institucionales, políticos, legales y ambientales.

Diagrama 1. Marco de la gestión sostenible integral de residuos sólidos.



Fuente: UN-HABITAT (2010, pág. 27)

Otro aspecto para tener en cuenta es la jerarquía de gestión de residuos, aspecto fundamental porque provee una preferencia de las alternativas de gestión disponibles. Esta jerarquía ha variado a pasar del tiempo; en sus inicios, hace aproximadamente 40 años, priorizaba la reducción, luego el reciclaje y la reutilización sobre la opción del tratamiento y disposición. En 2008, el principio de jerarquía de residuos se incluyó en la Directiva Marco de Residuos 2008/98 / CE (Waste Frame Directive - WFD) y posteriormente se incorporó a la legislación nacional de los Estados miembros de la Unión Europea (UE). La UE en su WFD define la jerarquía de gestión de residuos que se presenta en el Diagrama 2, este refleja el orden de prioridad de las operaciones a seguir en la GIRS, y corresponde a prevenir, preparar para reutilizar, reciclar, valorización (incluye la valorización energética) y disposición, como se aprecia en el Diagrama 2 (El Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea, 2008).

Diagrama 2. Jerarquía en la gestión integral de residuos.



Fuente: Elaborado por autor basado en El Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea (2008)

En Colombia la jerarquía de la gestión integral de residuos hace parte de la Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos establecida en el CONPES 3874 de 2016, la cual entrega lineamientos claros para una transición hacia la economía circular (CONPES 3874, 2016).

Además de la jerarquía de residuos, uno de los conceptos que también deben tenerse en cuenta en la Gestión Integral de Residuos Sólidos, es el marco analítico de los dos triángulos construido por UN-Hábitat (UN-HABITAT, 2010) estableciéndose como herramienta complementaria, plantea un escenario con dos grandes conjuntos de elementos representados por dos triángulos. El primero de ellos hace referencia a los elementos físicos del sistema o “hardware”, el cual cuenta con tres componentes, el primero de ellos es la salud pública, manteniendo un buen servicio de recolección. El segundo es el medio ambiente, garantizando su cuidado a través de sistemas de tratamiento y/o disposición que lo protejan. Y por último la gestión de recursos, utilizándolos para cerrar el ciclo, dando a los materiales y nutrientes un uso beneficioso, previniendo el desperdicio y esforzándose por lograr altas tasas de recuperación, reutilización y reciclaje.

El segundo triángulo también tiene tres componentes catalogados como el “software” de este marco de referencia. El primero de ellos es la inclusividad dando espacios de interacción entre todos los interesados como los proveedores del servicio, los usuarios y los facilitadores para que participen en la planeación, implementación y monitoreo de cambios. El segundo componente es la sostenibilidad financiera pues el sistema debe ser rentable y asequible. Y, por último, las instituciones fuertes y políticas proactivas que den un marco normativo para que el sistema funcione adecuadamente. Este esquema se puede observar en el Diagrama 3.

Diagrama 3. Marco analítico de los dos triángulos



Fuente: Basado en UN-HABITAT (2010)

2.2. Situación actual y esquema de gestión de RSU en Bogotá

En la ciudad de Bogotá, de acuerdo con el decreto 261 de 2010 de la alcaldía de Bogotá, el sistema general de residuos sólidos está clasificado en dos subsistemas, el subsistema del servicio público de aseo y el subsistema de reciclaje y aprovechamiento de residuos sólidos ordinarios. El primero está compuesto por a) infraestructuras e instalaciones técnicas (rellenos sanitarios, plantas de tratamiento de biogás, celdas de seguridad, plantas de compostaje, plantas de incineración, estaciones de transferencia y sitios de acopio temporal) b) equipamientos (base de operación de los operadores, oficinas y centros de atención al usuario). C) mobiliario urbano (cestas, contenedores,

cajas estacionarias). El segundo sistema está compuesto por plantas de aprovechamiento de residuos de construcción y demolición, parques de reciclaje, estaciones de clasificación y aprovechamiento (ECA) (Decreto 261, 2010). Teniendo esto presente, el subsistema de servicio público de aseo comprende las actividades de recolección, transporte, barrido, limpieza de vías y áreas públicas, corte de césped, podas de árboles en las vías y áreas públicas, transferencia, tratamiento, aprovechamiento, disposición final y lavado de áreas públicas (Decreto 2981, 2013) y fue concesionado por la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos (UAESP), en el 2018 con un plazo de 8 años, a 5 operadores en 5 Áreas Exclusivas de Servicio (ASE), donde se encargan de prestar el servicio en diferentes localidades de la ciudad como se presenta en la Tabla 1, estos operadores tienen la responsabilidad de recolectar los residuos además de realizar la limpieza de paredes, postes y puentes, barrido de vías, corte de césped, poda de árboles, lavado de áreas públicas e instalación de cestas y contenedores de residuos (Rueda, 2018). Esta concesión no incluye la administración y operación del relleno sanitario, que está a cargo del Centro de Gerenciamiento de Residuos Doña Juana S.A. E.S.P. desde el 17 de septiembre de 2010 y administra, opera y realiza mantenimiento integral del Relleno Sanitario Doña Juana en sus componentes de disposición final, tratamiento de lixiviados y alternativas de aprovechamiento de los residuos sólidos (CGR Doña Juana, 2020).

Tabla 1. Operadores de aseo Bogotá

OPERADOR	LOCALIDAD
Promoambiental S.A.ESP	Usaquén Chapinero La Candelaria Santa Fe San Cristóbal Usme Sumapaz
Lime S.A.ESP	Bosa Tunjuelito Ciudad Bolívar Teusaquillo Puente Aranda Los Mártires Antonio Nariño Rafael Uribe
Ciudad Limpia S.A. ESP	Fontibón Kennedy
Bogotá Limpia S.A. ESP	Engativá Barrios Unidos
Área Limpia S.A.ESP	Suba

Fuente: Sistema de Información para la Gestión de Aseo Bogotá - SIGAB (2020)

Cada uno de estos operadores debe cumplir con la instalación de contenedores de residuos aprovechables y no aprovechables, ubicando aproximadamente 10.746 contenedores (Caracol Radio, 2019), en distintos sitios de la ciudad con el objetivo de prevenir focos de contaminación que afectaran y deterioraran la armonía del espacio público urbano; en estos, la ciudadanía deposita los residuos aprovechables y no aprovechables como se aprecia en la Imagen 1. Estos no han sido de gran ayuda al esquema de aseo (Caracol, 2018) aumentando la cantidad de RSU que llegan al relleno sanitario que en el 2017, antes de implementar este sistema, recibió 2.256.361 toneladas de residuos y en el 2018 recibió 2.340.460 toneladas y en el 2019, 2.444.330 (SUI, 2020), lo representa un aumento de 4.2% del 2018 a 2019 en la disposición de residuos, sin contar los de los demás municipios de Cundinamarca que llevan sus residuos allí.

Imagen 1. Contenedores instalados en Bogotá



Fuente: Torres (2018)

Dentro de este esquema, la actividad de aprovechamiento no está en manos exclusivas de los operadores, lo que estos deben hacer es garantizar el acceso a los residuos aprovechables a los recicladores de oficio, conforme a lo estipulado en el decreto 596 de 2016 donde esta actividad es de libre competencia, dando libertad a los recicladores de oficio a prestar este servicio en cualquiera de las 20 localidades de Bogotá (Decreto 596, 2016). Siendo así, la fracción de residuos aprovechables que no llega al relleno está a cargo de los recicladores de oficio, que según el decreto 1077 de 2015 es la *“persona natural que realiza de manera habitual las actividades de recuperación, recolección, transporte, o clasificación de residuos sólidos para su posterior reincorporación en el ciclo económico productivo como materia prima; que deriva el sustento propio y familiar de esta actividad”* (Decreto 1077, 2015) y estos posteriormente entregan estos residuos a las Estaciones de Clasificación y Aprovechamiento (ECA), lugares autorizados por la autoridad ambiental que pesan y clasifican los residuos sólidos

aprovechables y que según datos del Sistema Único de Información de Servicios Públicos Domiciliarios (SUI) recibieron en el 2019, 1.085.194 toneladas de residuos aprovechables. Dentro del hipotético caso de un esquema con una planta de valorización de residuos, las ECA y los recicladores de oficio continuarían con sus actividades.

Cada uno de estos operadores entrega los RSU recolectados en el relleno sanitario Doña Juana a razón de 684 viajes diarios (UAESP, 2020a). Una vez ingresan al relleno son “enterrados” sin ningún tipo de separación o tratamiento, desaprovechando el potencial calorífico de los mismos, en especial de la materia orgánica que es el 73.87% según la caracterización realizada en el 2017 incluida en el decreto 652 de 2018 donde se ajustan los datos de la línea base del PGIRS de la ciudad (Resolución 652, 2018).

Según el censo del 2018 realizado por el DANE, Bogotá tiene una población de 7,412,566 habitantes (DANE, 2020) y se ha calculado por parte del Observatorio Ambiental de Bogotá (2020), una disposición de residuos sólidos en relleno sanitario per cápita al año de 0.28 t, lo que nos arroja una producción de residuos de 2.060.693 toneladas al año; es decir, 5.724 toneladas diarias, son llevadas al único relleno sanitario de la ciudad y la única alternativa actual de disposición de RSU, Doña Juana. Este lugar no sólo recibe los residuos de Bogotá, sino también los de municipios aledaños como Cáqueza, Choachí, Chipaque, Fosca, Gutiérrez, Ubaque y Une (UAESP, 2020a). A lo largo de la operación del relleno, se han presentado diferentes episodios de derrumbes de residuos que han acarreado serios problemas a la ciudad y a los barrios aledaños, el primero de ellos en 1997 con un derrumbe de 800.000 toneladas, el más grave de todos (Barreto, 2017), en el 2015, 370.000 toneladas y en el 2020 uno de 80.000 toneladas (Ramos Gutierrez, 2020).

Para el Relleno Sanitario Doña Juana, Inicialmente se tenía contemplada una vida útil de 30 años correspondiente al año 2018, sin embargo algunos cálculos y estudios contratados por la UAESP estimaron que la fase 1 del relleno finalizaría su operación en el 2016 según el Proyecto de Estudio del Plan Maestro para el Manejo Integral de Residuos Sólidos en Bogotá, D.C. (UAESP, 2013), por otra parte el relleno solamente cuenta con licencia ambiental vigente hasta 2022 y se habla de que su capacidad llegaría al límite en el mismo año, no obstante, el mismo gobierno distrital se encuentra realizando estudios para extender su vida útil 30 años realizando actividades técnicas como el aumento en el factor de compactación, construcción de las terrazas y las obras respectivas para aumentar la capacidad del relleno, así como la promoción de campañas

de sensibilización y promoviendo la separación en la fuente con el fin de aumentar la recuperación de residuos de un 15.37% a un 40% en el 2050 (UAESP, 2018).

El manejo de los residuos sólidos en la ciudad de Bogotá ha evolucionado a través del tiempo en relación con las necesidades de gestión de la ciudad, en el año de 1958 por medio de un acuerdo fue creada la Empresa Distrital de Aseo (EDIS) encargándose de la recolección, transporte, y disposición de residuos en Bogotá, así como también de la limpieza de sus calles, y es sólo hasta 1994 que tal empresa se disuelve y la gestión de residuos y prestación del servicio de aseo en Bogotá queda a cargo de empresas privadas que licitan la prestación de sus servicios ante la Comisión Reguladora de Agua Potable (CRA) y la Alcaldía Local (Vaquiro, L., y Barjas, N, 2017, pág. 55), esta licitación adjudica la actividad por un lapso de 5 años a operadores privados, no obstante su gestión se extendió hasta el mes de septiembre del año 2003 debido a que la nueva licitación fue resuelta en el mismo año mediante los contratos de concesión no. 53, 54, 55, y 69 de 2003 (Vaquiro, L., y Barjas, N, 2017, pág. 80). Posteriormente en el año 2011 se da la apertura de una nueva licitación para la ciudad en donde el distrito se dividió en seis áreas de servicio especial e incorporó el componente de reciclaje. (Vaquiro, L., y Barjas, N, 2017, pág. 85).

Los RSU (RSU) están definidos en el decreto 1713 de 2002, que regula la prestación del servicio público de aseo y la Gestión Integral de Residuos Sólidos en la ciudad de Bogotá, como *“cualquier objeto, material, sustancia o elemento sólido resultante del consumo o uso de un bien en actividades domésticas, industriales, comerciales, institucionales, de servicios, que el generador abandona, rechaza o entrega y que es susceptible de aprovechamiento o transformación en un nuevo bien, con valor económico o de disposición final. Los residuos sólidos se dividen en aprovechables y no aprovechables. Igualmente, se consideran como residuos sólidos aquellos provenientes del barrido de áreas públicas”* (Decreto 1713, 2002).

El Informe Nacional de Disposición de Residuos Sólidos 2018 indica que en Colombia se dispusieron 30.973 toneladas/día de residuos sólidos, de los cuales el 97.80% es dispuesto en sistemas autorizados y el 2.20% restante aun es dispuesto de sitios no autorizados. Del total de Colombia, Bogotá es el que más residuos dispone al día con 6.366,64 toneladas día (Superintendencia de Servicios Públicos & DNP, 2019).

La composición categoriza los tipos de materiales que se encuentran en el conjunto de los RSU. Esta composición varía dependiendo los niveles de ingresos del país que los genera. A nivel general, según el informe del Banco Mundial What a Waste 2.0 A Global

Snapshot of Solid Waste Management (2018), los RSU se componen en gran parte por residuos de comida, con un 44%, potencialmente reciclables el 38% y los inertes el 9%.

Para la ciudad de Bogotá, la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos (UEASP) emitió la resolución 799 de 2012, donde establece un listado detallado de los materiales reciclables y no reciclables para la separación en la fuente de los residuos sólidos domésticos en el distrito capital. Esta resolución en su artículo primero define los Materiales Potencialmente Reciclables y Aprovechables (MPR) en los siguientes grupos: 1. Papel y Cartón, 2. Plástico, 3. Vidrio, 4. Metales, 5. Textiles; y en el artículo segundo, lista los residuos ordinarios así: a) restos de comida, b) papel higiénico, c) papel absorbente usado (servilletas, papel de cocina, faciales), d) pañales y elementos sanitarios, e) papel parafinado, f) papel plastificado, g) papel carbón, h) material papel o cartón impregnado de grasa, i) residuos de barrido, j) papel metalizado, k) cajas y colillas de cigarrillos, l) materiales reciclables que se encuentran contaminados, sucios o húmedos. (Resolución 799, 2012b) La misma UAESP, realizó un estudio de caracterización en el año 2017, abordando una de tipo macroscópico de los residuos en la ciudad de Bogotá y obtuvo información precisa sobre los residuos generados en la ciudad, que se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Composición macroscópica de residuos Bogotá 2017

Material	Porcentaje de generación
Orgánicos	51.32 %
Plásticos	16.88 %
Celulosas	13.67 %
Textiles	4.54 %
Vidrios	3.67 %
Madera	1.60 %
Finos	1.43 %
Metales	1.13 %
Complejos	0.96 %
Inertes	0.84 %
Peligrosos domiciliarios	0.61%

Fuente: CONSORCIO NCU- UAESP (2018)

Conocer la composición y algunas características fisicoquímicas de los RSU resulta importante, establecer propiedades como el poder calorífico (PC), la humedad, o el porcentaje de material inerte, se configura en aspectos claves para seleccionar una tecnología de valorización energética adecuada, en la Tabla 3 se refieren algunos de los parámetros que son considerados para establecer caracterizaciones fisicoquímicas de RSU en consideración de lo planteado por Acosta (2015).

Tabla 3. Características fisicoquímicas de los residuos sólidos

Característica	Tipo	U.M.	Definición
Química	Poder calorífico	Kcal/Kg	Cantidad de energía que entrega una unidad (kg o m3) de combustible al oxidarse de forma completa.
Química	Sustancias químicas	%	Porcentajes de cenizas, materia orgánica, C, N, K, Ca, P, relación C/N, humedad, entre otros.
Física	Peso Especifico	Kg/m3	Es la relación del peso de los residuos en función del volumen que ocupan. Es fundamental para el dimensionar de equipos e instalaciones.
Física	Composición Gravimétrica	%	Peso porcentual de cada componente en relación con el peso total de RS.
Física	Humedad	%	Cantidad de agua presente en los residuos en relación con su peso y composición.

Fuente: Elaboración propia basado en Acosta (2015)

Para los residuos generados en la ciudad de Bogotá, estas características fueron determinadas para el sector residencial y comercial en un estudio realizado por la UAESP en el 2011, incluyendo los siguientes grupos de residuos; desechos de comida, papel, cartón, plásticos, madera, vidrio, textiles, caucho, metales ferrosos, metales no ferrosos y otros, en la Tabla 4, es posible observar los componentes químicos y el poder calorífico de los grupos de residuos estudiados (Collazos Peñaloza, 2011b).

Tabla 4. Componentes químicos y poder calorífico de la masa degradable (orgánicos) de los residuos sólidos residenciales y comerciales

Parámetros	Residenciales	Comerciales	U.M.
Poder calorífico Sup.	894.17	2250	Kcal/Kg
Poder Calorífico Inf.	745.63	2128	Kcal/Kg
% Humedad Total	67.18	59.9	%
% Cenizas	4.04	7.48	%
% Carbono	10.31	13.54	%
% Nitrógeno	0.58	0.97	%
Otros	17.89	18.11	%

Fuente: Elaboración propia basado en Collazos Peñaloza (2011a) Y Collazos Peñaloza (2011b)

2.3. Valorización energética de RSU

La valorización energética de RSU, consiste en aplicar energía calorífica con el fin de lograr la transformación del residuo, ya sea para su incineración; disminuyendo su peso y volumen, facilitando su posterior disposición, o utilizándolos como combustible para la obtención de energía, lo que se conoce como valorización energética del residuo (García L, 2019).

En la jerarquía de residuos, explicada en el Diagrama 2, definida por la Unión Europea en la Directiva Marco sobre Residuos 2008/98/CE (El Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea, 2008), la recuperación energética de residuos se encuentra en cuarto lugar después del reciclaje evidenciando su rol fundamental en la transición a una economía circular sin dejar de lado el objetivo de prevención, reúso y reciclaje de residuos. Las alternativas de valorización energética de los RSU más utilizadas en el mundo son la incineración, la pirolisis, la gasificación y la digestión anaeróbica (Mutz, Hengevoss, Hugi, & Gross, 2017).

Además, el documento CONPES 3874 hace referencia a la participación del aprovechamiento energético de residuos como parte de los principios de la economía circular como se la aprecia en el Diagrama 4.

Diagrama 4. Principios de la economía circular.

Ecoconcepción

- Considera los impactos medioambientales a lo largo del ciclo de vida de un producto y los integra desde su concepción.

Ecología industrial y territorial

- Establecimiento de un modo de organización industrial en un mismo territorio, caracterizado por una gestión optimizada de los stocks y de los flujos de materiales, energía y servicios.

Economía de la funcionalidad

- Privilegiar el uso frente a la posesión y la venta de un servicio frente a la venta de un bien.

Segundo uso

- Reintroducir en el circuito económico aquellos productos que ya no se corresponden a las necesidades iniciales de los consumidores.

Reutilización

- Reutilizar ciertos residuos o ciertas partes de los mismos que todavía pueden funcionar para la elaboración de nuevos productos.

Reparación

- Encontrar una segunda vida a los productos estropeados

Aprovechamiento

- Aprovechar los materiales que se encuentran en los residuos.

Valorización (Tratamiento)

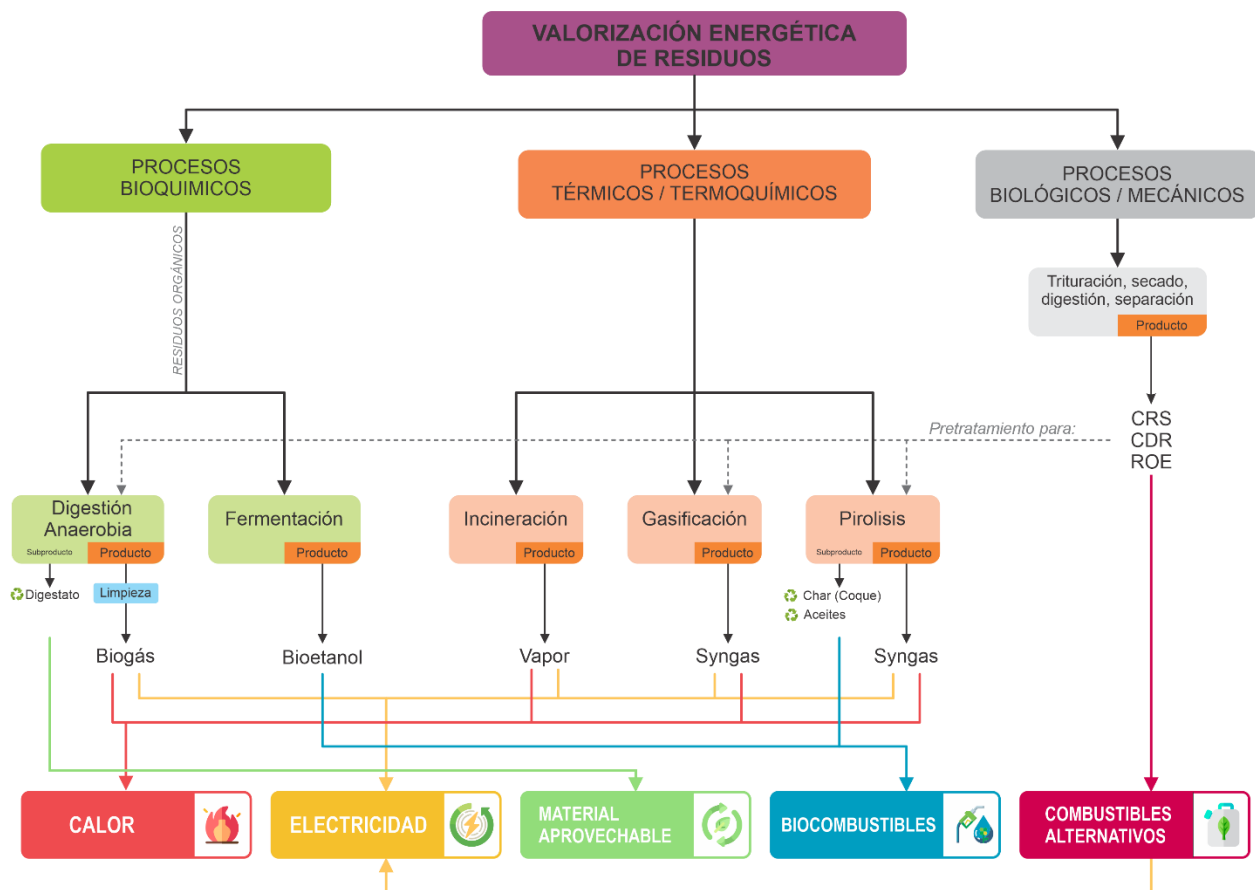
- Aprovechar energéticamente los residuos que no se pueden reciclar.

Fuente: CONPES 3874 (2016)

2.3.1. Definición

La valorización energética de residuos comprende diferentes procesos aplicados por medio de tecnologías que convierten residuos; pueden ser líquidos o sólidos, en energía útil en forma de electricidad, calor o como combustibles, que pueden ser líquidos o gaseosos (Beyene, Werkneh, & Ambaye, 2018). Este campo abarca diversas tecnologías a diferentes escalas que van desde la producción de gas para cocina en digestores caseros, la obtención y aprovechamiento del gas metano generado en un relleno sanitario hasta plantas incineradoras con recuperación energética de tamaño industrial (Mutz, Hengevoss, Hugi, & Gross, 2017).

Diagrama 5. Procesos de valorización energética de residuos



CRS: Combustible Sólido Recuperado. CDR: Combustible Derivado de Residuos. ROE: Residuo Orgánico Estabilizado

Fuente: elaboración propia basado en AlQattan, y otros (2018) y Fernandez-Gonzalez (2014)

Las tecnologías utilizadas en la actualidad para la valorización energética de residuos utilizan procesos bioquímicos, termoquímicos y biológicos-mecánicos, las cuales

entregan la energía generada de distintas formas como se puede ver en el Diagrama 5. La fermentación y la digestión anaerobia hacen parte los procesos bioquímicos que utilizan bacterias, microorganismos o encimas para descomponer la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) (Beyene, Werkneh, & Ambaye, 2018), convirtiéndola en biogás, bioetanol o bio-hidrogeno (Sharmaa, y otros, 2020), combustibles que pueden ser usados como biocombustibles, electricidad o calor. Los procesos termoquímicos descomponen los RSU a temperaturas elevadas en presencia total de oxígeno (incineración), con control parcial de oxígeno (gasificación) y en ausencia total de oxígeno (pirólisis) (Beyene, Werkneh, & Ambaye, 2018). Los procesos biológicos - mecánicos combinan separación mecánica, es la aplicación de diferentes procesos de separación, secado, trituración para convertir los RSU en CDR (Combustible derivado de residuos o RDF Refuse Derived Fuel) para incrementar su poder calorífico, remover materiales reciclables, inertes y contaminantes (EPA Victoria, 2017) o producir Residuos Orgánicos Estabilizados - ROE (SOW Stabilized Organic Waste) usados en los procesos bioquímicos (Fei, Wen, Huang, & Clercq, 2018).

Estas tecnologías están alineadas con la jerarquía de gestión de residuos, presentada en el Diagrama 2, no solamente en su componente de valorización, sino que algunos subproductos pueden ser reciclados y en cuanto a disposición final, es posible utilizar la incineración y la recuperación de metano de relleno sanitario como se presenta en el Diagrama 6.

Diagrama 6. La jerarquía de residuos y los procesos de valorización energética de residuos

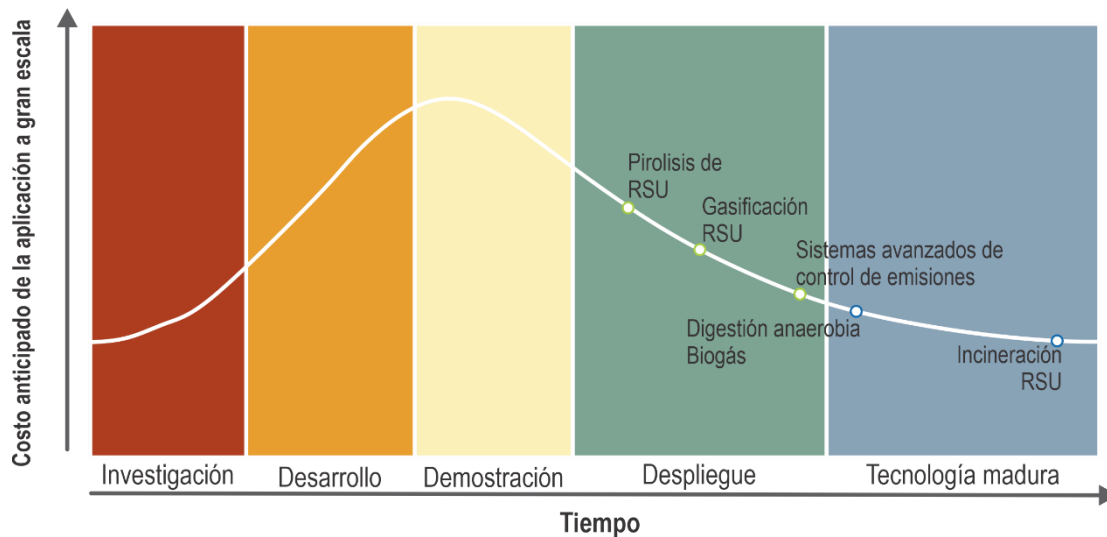


Fuente: elaborado por el autor basado en European Commission (2017) y El Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea (2008)

2.3.2. Costos asociados a las tecnologías de valorización energética de residuos

Cada una de las tecnologías anteriormente nombradas presenta diferentes niveles de madurez, afectando así mismo sus costos del capital (CAPEX) y sus costos de operación (OPEX). Como se puede ver en Gráfico 1, la incineración de residuos es la tecnología más madura de todas, lo que hace que sus costos de inversión y operación sean menores que los de la gasificación y la pirolisis. Así mismo, los sistemas avanzados de control de emisiones también están en una etapa de despliegue lo que hace que con el tiempo los costos de estos dispositivos disminuyan.

Gráfico 1. Etapas de madurez comercial de las tecnologías de valorización energética de residuos



Fuente: Adaptado de Tan (2013)

En cuanto a los costos de capital necesarios para la construcción de este tipo de tecnologías, se debe tener en cuenta la distribución de los gastos, los cuales se dividen en cinco componentes clave, cada uno con un peso, como se muestra en la Tabla 5, que corresponde a experiencias de implementación de plantas térmicas (combustión, gasificación y pirolisis) en Europa, pero que pueden dar una guía importante para efectos de esta investigación.

Tabla 5. Distribución de los costos de capital para proyectos térmicos de valorización energética de residuos

COMPONENTE	PORCENTAJE DEL CAPITAL
Equipo de procesamiento térmico	40%
Equipo de generación de energía	10%
Sistema de control de emisiones	15%
Obras civiles	25%
Varios (trabajos generales del sitio, procesamiento de cenizas, transmisión e interconexión eléctrica, etc.)	10%

Fuente: Stantec Consulting (2011)

Para un proyecto de digestión anaerobia la distribución de costos cambia, ya que las instalaciones y los equipos utilizados el proceso es diferente a las tecnologías térmicas. Los porcentajes mostrados en la Tabla 6 corresponden a proyectos robustos de plantas de DA en Europa, utilizados en una evaluación de factibilidad realizada para tratar la fracción orgánica de los RSU en la ciudad de México en 8 biodigestores con una capacidad total de 51.472 m³. La capacidad de almacenamiento de biogás es de 21.900 m³ y que produce aproximadamente 6 MW (Tsydenova, y otros, 2019)

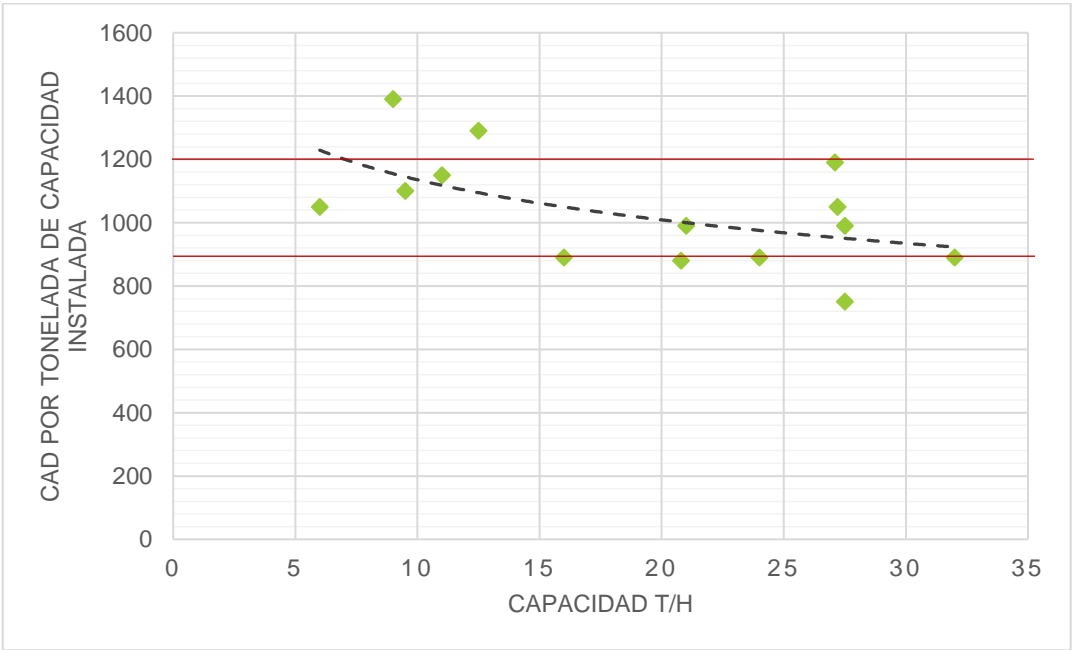
Tabla 6. Distribución de los costos de capital para proyectos DA de valorización energética de residuos

COMPONENTE	PORCENTAJE DEL CAPITAL
Tecnología (Equipos eléctricos, equipos de gas y calefacción equipo, tecnología de alimentación y pretratamiento)	41%
Evaporador	18%
Unidades CHP	13%
Obras civiles	16%
Edificio de recepción y tratamiento de aire	4%
Instalaciones eléctricas	4%
Planeación	1%
Tramites, seguros y Consultoría	1%
Otros	2%

Fuente: Adaptado de Tsydenova, y otros (2019)

Un estudio realizado por la empresa de consultoría Stantec (2011) para el ministerio de ambiente de la provincia de Columbia Británica en Canadá, reviso la información de 14 proyectos de valorización energética ejecutados en Europa durante 10 años (el informe data del 2011) y los resultados se muestran en el Gráfico 2, en el cual se puede ver que los costos por tonelada de capacidad instalada más habituales están entre CAD\$900 y CAD\$1200; y estos costos entre una planta de 5 tph¹ y una de 30 tph difiere un 25%, lo que da indicios que los costos de capital para una planta de valorización energética de RSU puede diferir significativamente dependiendo la región donde se instale, disponibilidad de materiales, etc.

Gráfico 2. Comparación de los costos de capital por capacidad instalada en proyectos de valorización energética de residuos



Fuente: Stantec Consulting (2011)

Otra de las fuentes que aportan un valor estimado acerca de los costos de capital y operación de las tecnologías de valorización energética, es un reporte realizado por el Banco Mundial en el 2011, en este analiza la viabilidad de las tecnologías emergentes para el tratamiento y la disposición de residuos sólidos y presentan un rango de capacidad de procesamiento y el total de recursos que debería desembolsarse (valores

¹ Tph: tonelada por hora

en dólares americanos) por cada una de las tecnologías revisadas, esto se presenta en la Tabla 7.

Tabla 7. Datos estimados de inversión por capacidad de procesamiento

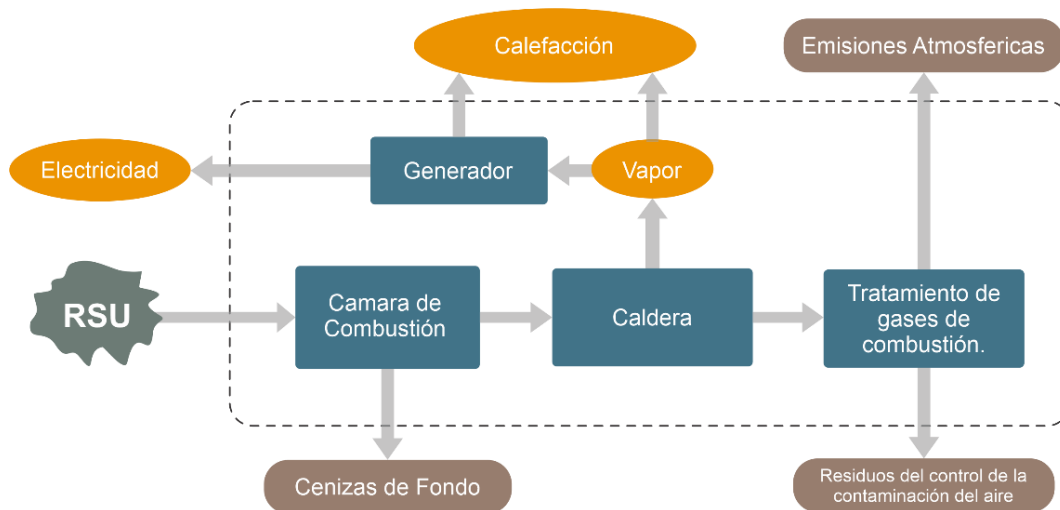
Tecnología	Capacidad de procesamiento anual típica	Desembolso total USD\$
Incineración	17.000 a 1.650.000	15.000.000 a 495.000.000
Gasificación/pirolisis	13.000 a 297.000	6.000.000 a 288.000.000
Digestión Anaeróbica	19.000 a 240.000	3.800.000 a 144.000.000

Fuente: Adaptado de Hernández, Marrero, Minott, & Quintana (2011)

2.3.3. Incineración

La incineración considerada en este documento corresponde a la que vincula la recuperación energética, esta es una alternativa de tratamiento, la cual por medio de un proceso de combustión completa y controlada reduce el peso y el volumen de los RSU, además promueve una potencial recuperación de energía (Rao, y otros, 2018). El Diagrama 7 muestra el esquema del proceso y el flujo de los materiales, así como los productos y los residuos tanto sólidos como de emisiones que se producen.

Diagrama 7. Esquema básico proceso de incineración de residuos



Fuente: Liu, Nishiyama, Kawamoto, & Sasaki (2020)

Para implementar el proceso se utiliza principalmente la fracción de RSU que no son susceptibles de aprovechamiento o que por sus condiciones o características no son reciclables y por lo general están mezclados. En el proceso de combustión, los residuos circulan por una parrilla donde inicialmente se realiza un secado de los RSU a una

temperatura de 100 a 250 °C; luego de pasar por diferentes etapas, los RSU son sometidos a temperaturas de 850 a 1.200°C en donde se produce la combustión liberando gases y sólidos.

Los sólidos resultantes del proceso de combustión son las cenizas volantes y escorias de los residuos incinerados. Las cenizas volantes son en su mayoría metales y material particulado, y las escorias o residuos de fondo que es la combinación del material total o parcialmente quemado, estos residuos deben ser dispuestos como residuos peligrosos, o pueden ser sometidos a procesos de valorización para la fabricación de morteros para construcción (CEDEX, 2014).

Una parte clave en un sistema de incineración de residuos es el control de emisiones (APC por sus siglas en inglés – Air Pollution Control). Las emisiones que deben controlados habitualmente en este tipo de instalaciones son el polvo, gases ácidos, óxidos de nitrógeno (NOx), dioxinas y mercurio (Liu, Nishiyama, Kawamoto, & Sasaki, 2020). Estos APC están compuestos por diferentes tecnologías para reducir los contaminantes como los óxidos de nitrógeno, que se pueden reducir en un 10% a un 60% utilizando la reducción catalítica selectiva; las dioxinas y furanos son reducidas en un 50% a un 99.9% a través de carbón activado y un filtro de mangas (Quina, Bordado, & Quinta-Ferreira, 2011). El uso de otros equipos como lavadores secos o húmedos, precipitadores electrostáticos, multiciclones, hacen parte de estos sistemas que garantizan que las emisiones se mantengan por debajo de los niveles nocivos y permitidos por la regulación. Previo a este tratamiento, estos gases producidos a altas temperaturas contienen la mayor parte de la energía, y son utilizados para generar vapor y producir electricidad. Esta tecnología que opera con temperaturas entre 726 y 1726 °C podría llegar a generar 544 kWh por tonelada de RSU (Campos, Zamenian, Koo, & Goodman, 2015).

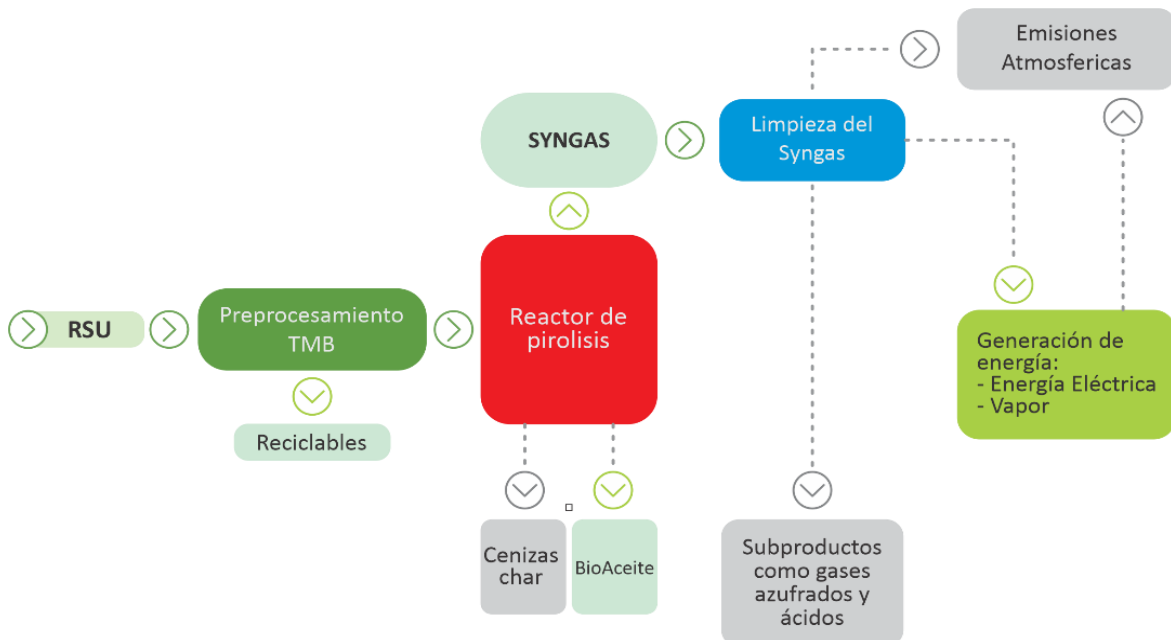
2.3.4. Pirolisis

Es considerada una tecnología alternativa para el tratamiento termoquímico de residuos y guarda cierta similitud con la incineración, busca reducir el volumen y eliminar fracciones de residuos peligrosos, así como también recuperar energía y aprovechar los materiales resultantes en estado sólido y gaseoso. El tipo de residuos que se usan como materia prima en esta tecnología son RSU, combustibles derivados de residuos (RDF) aguas residuales, lodos, carbón, llantas, biomasa, cloruros y polivinilos (Qazi & Abushammala, 2020). El proceso consiste en descomponer térmicamente la materia

orgánica presente en los residuos en ausencia de oxígeno. En este proceso se descomponen todos los compuestos basados en carbono que contienen los residuos dando como resultado gases, hidrocarburos condensables y un residuo carbonoso sólido llamado char, también conocido como coque (Castells X. E., 2005).

El Diagrama 8 representa gráficamente el esquema básico de la pirolisis en donde se inicia con el preprocesamiento del RSU que llegan a las instalaciones, de allí son retirados los materiales reciclables y los inertes al no ser aptos para el proceso. Una vez los RSU entran al reactor se produce el syngas y los subproductos. Al final del proceso, este gas es utilizado para producir energía.

Diagrama 8. Esquema básico pirolisis



Fuente: Young (2010) y Campos, Zamenian, Koo, & Goodman (2015)

Cada uno de los productos resultantes de la pirolisis cuenta con características particulares que los hace aprovechables y aptos para ser utilizados como fuentes de generación de energía o como combustibles para el mismo proceso de pirolisis y otras aplicaciones industriales. El Syngas, también llamado gas de síntesis contiene hidrógeno (H), metano (CH₄), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂). La composición de los productos obtenidos en el proceso, y el valor del PCI depende de la velocidad de calentamiento, la temperatura del proceso, el tamaño de la partícula del RSU y el tiempo de residencia del gas (Qazi & Abushammala, 2020). Además del gas, también se producen una mezcla de sólidos, llamada char o coque, y líquidos, también llamados

aceites de pirolisis u oxigenados; al igual que el gas, la composición de estos subproductos, depende de las mismas condiciones (Qazi & Abushammala, 2020). La pirolisis tiene tres tipos de reacciones, lenta (slow), rápida (fast) y flash. La pirolisis lenta (slow) es la convencional y forma char y alquitrán como los principales productos y se ejecuta a bajas temperaturas, cerca de 550 °C, baja tasa de calentamiento de materia prima desde 0.1 a 2 °C/s, y un tiempo de residencia de los sólidos de 450 a 550 segundos. La pirolisis rápida (fast) produce bioaceite y alquitrán. Esta trabaja a tasas de calentamiento sobre los 2°C/s, a temperatura moderada entre 586 °C a 977 °C y un tiempo de residencia de 0.5 a 10 segundos. Por último, la pirolisis flash, se ejecuta a temperaturas altas, entre 777 °C a 1027 °C y un tiempo muy corto de residencia de sólidos y un alta tasa de calentamiento, entre 200-10⁵ °C/s como resultado se producen gases ricos en etileno (Qazi & Abushammala, 2020). Se estima que un proceso de gasificación puede llegar a producir 571 kWh por tonelada de RSU (Campos, Zamenian, Koo, & Goodman, 2015).

En la Tabla 8 y Tabla 9, Castells (2005, pág. 492) presenta el gas y el subproducto sólido, cuya composición depende de la temperatura, entre otros factores, a las que son sometidos los RSU y que son una guía para el presente estudio.

Tabla 8. Composición fracción sólida obtenida en la pirolisis de RSU

Tipo	°C	H	C	N	O	S	PCI kcal/m ³
RSU	500	0,4	32,4	0,5	0,5	0,2	2.766
RSU	700	0,8	54,9	1,1	1,8	0,2	4.419
RSU	900	0,3	36,1	0,5	0,0	0,2	2.898

Fuente: Castells X. E. (2005)

Tabla 9. Composición del gas obtenido en la pirolisis de RSU

°C	CO	CO ₂	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	PCI kcal/m ³
650	30,5	31,8	16,5	15,9	3,1	2,2	2.821
815	34,1	20,6	28,6	13,7	0,8	2,2	2.744
927	35,3	18,3	32,4	10,5	1,1	2,4	2.695

Fuente: Castells X. E. (2005)

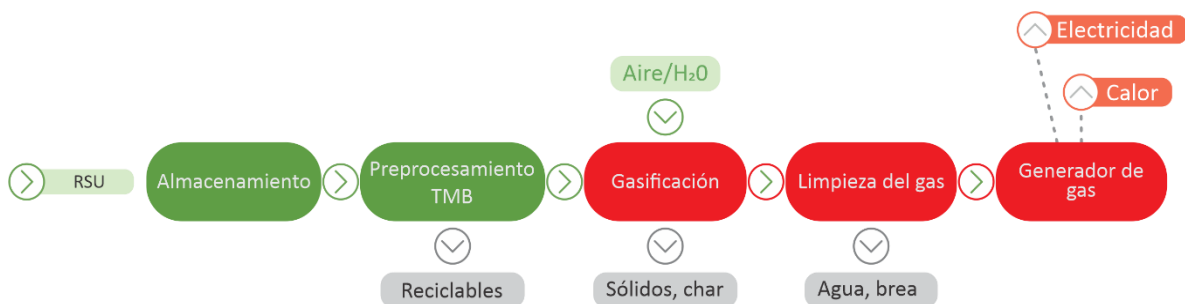
Dentro de las ventajas ambientales de este proceso se resalta que, al ser un proceso realizado en ausencia de oxígeno, imposibilita la formación de dioxinas y furanos. Además, el propio residuo resultante del proceso es utilizado como fuente de combustible, repercutiendo en un considerable ahorro de energía.

La pirolisis es un proceso complejo que requiere personal altamente especializado para su operación exitosa; además, requiere flujos de residuos específicos para su operación. Otro aspecto para tener en cuenta son sus altos costos iniciales y de operación, y el costo de venta de los productos resultantes del proceso al no ser suficientes para cubrir los gastos de operación.

2.3.5. Gasificación

La gasificación hace parte de los procesos termoquímicos y de las tecnologías alternativas de tratamiento de RSU. En el Diagrama 9 es posible observar el esquema básico, el cual inicia por el almacenamiento de los RSU, luego se pasa por el preprocesamiento, donde, al igual que en la pirolisis, son retirados los materiales aprovechables e inertes. En este pretratamiento se transforman los RSU en RDF, disminuyendo el porcentaje de humedad y triturándolos para obtener una partícula homogénea y granulometría constante (Texeira Coelho, 2020). Luego, el RDF ingresa a la cámara de gasificación. Al final se produce el Syngas aprovechable y algunos subproductos que pueden ser valorizados. Este proceso se realiza únicamente con el 25% al 30% de oxígeno necesario para una combustión completa, a diferencia de la incineración donde se realiza una combustión completa sin restricción de oxígeno, o, a diferencia de la pirolisis, en donde se realiza una descomposición térmica del residuo, sin agregar oxígeno al proceso, en palabras de Castells (2005, pág. 414) *“En la gasificación, la energía química contenida en el sólido se convierte en energía química contenida en un gas.”*

Diagrama 9. Esquema básico gasificación



Fuente: Cameron, Mozaffarian, & Falzon (2014)

Esta alternativa de tratamiento reduce el tamaño de los residuos, elimina posibles materiales tóxicos y hace más fácil su gestión final, aunque en este caso, los RSU no son

utilizados como combustible para el proceso, de hecho, son la materia prima para obtención por medio de oxidación parcial a altas temperaturas, un gas conocido como gas de síntesis o syngas compuesto por una mezcla de CO y H₂ y algunas cantidades de CH₄ dependiendo del reactor utilizado (Whiting, Fanning, & Wood, 2013). Este gas puede ser utilizado en productos comerciales con un valor importante como; combustible para transporte, fertilizantes o reemplazar el gas natural (GSTC, 2020). Se ha demostrado que la composición química, el rendimiento y el poder calorífico dependen de la temperatura del proceso y del agente oxidante, pudiéndose incluir oxígeno, aire o vapor o una mezcla de estos, así como del sólido gasificado. (Wajeena, Mohammed, Mohammed-HashamAzam, & Mohammed, 2018). Según Campos (2015, pág. 505) un proceso convencional de gasificación podría generar 685 kWh a partir de 1 tonelada de RSU.

La materia prima en este caso los residuos, deben ser sometidos a un pretratamiento, porque al proceso no pueden ingresar material inorgánico como metales, vidrios o elementos inertes. Luego, deben ser triturados y mantener un tamaño pequeño y uniforme de partículas para finalmente secarlos o retirar residuos de comida manteniendo una humedad por debajo del 15%.

El sistema de gasificación utiliza el gas de síntesis para alimentar el proceso y aporta la energía necesaria para mantener la reacción en el gasificador, ese mismo producto es utilizado para mover una turbina de gas y generar electricidad. Se debe tener en cuenta que en el gasificador se obtiene un producto residual (ceniza o fly ash) y se podrá disponer como residuo, usar como fertilizante o utilizar en actividades constructivas.

La gasificación como alternativa de tratamiento de RSU es una opción que, reduce el volumen de los residuos en un 90% con una formación de cenizas entre el 8% y 12%, mucho menor al compararlo con la incineración que produce entre el 15% y 20% (Wajeena, Mohammed, Mohammed-HashamAzam, & Mohammed, 2018). Además, genera un producto valorizable en su totalidad.

2.3.6. Digestión Anaeróbica

La digestión anaeróbica es un proceso bioquímico que consiste en la descomposición por medio de microorganismos en ausencia de oxígeno (anaerobia) de la fracción orgánica presente en los RSU para producir un gas combustible, conocido como biogás. Antes de entrar en el proceso, los RSU deben pasar por un pre-proceso para extraer

cualquier residuo inerte o inorgánico. El biogás que está compuesto en su mayoría por metano (CH₄), dióxido de carbono (CO) y otros gases como H₂S, H₂, NH₃ en pequeñas proporciones y tiene un poder calorífico inferior (PCI) aproximado de 5.250 Kcal/m³, es un gas con un porcentaje de metano del 60%. Puede ser utilizado para producir calor y electricidad por medio de una planta termoeléctrica combinada o motores de combustión, y debe ser sometido a un proceso de limpieza antes de ser utilizado, eliminando el ácido sulfhídrico; que es corrosivo, así como la humedad generada por el vapor de agua que contiene y es perjudicial para los equipos en donde se utiliza el biogás. La composición de biogás se presenta en la Tabla 10.

Tabla 10. Composición de biogás según el residuo utilizado

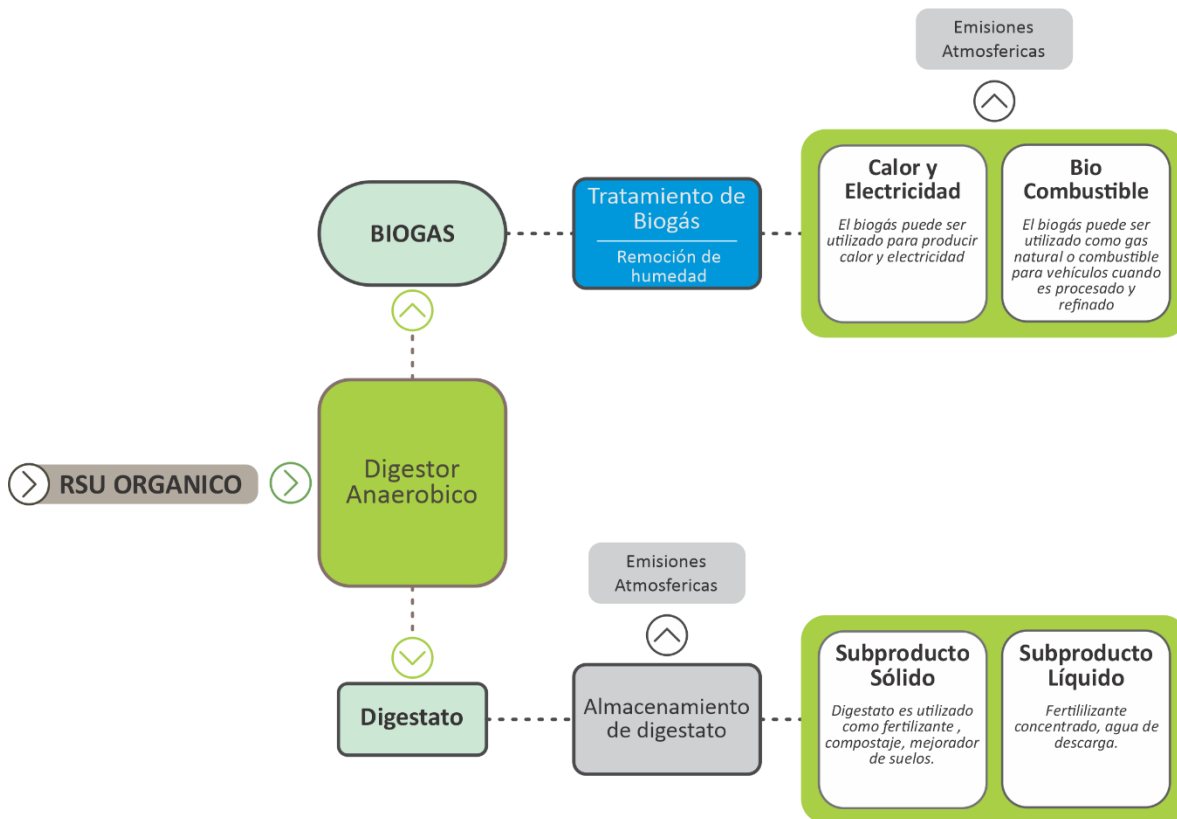
Componente	Residuos agrícolas	Residuos municipales
Metano	50-80%	50-70%
Dióxido de carbono	30-50%	30-50%
Agua	Saturado	Saturado
Hidrógeno	0-2%	0-2%
Sulfuro de hidrógeno	100-700 ppm	0-8%
Amoniaco	Trazas	Trazas
Monóxido de carbono	0-1%	0-1%
Nitrógeno	0-1%	0-1%
Oxígeno	0-1%	0-1%

Fuente: Castells X.E. (2005)

Como resultado de la digestión anaeróbica también se obtiene lodo residual orgánico o digestato, este se puede utilizar como abono, acondicionador de suelos o fertilizante. La composición de este producto depende de los residuos utilizados, el tipo de biodigestor y los parámetros configurados durante el proceso.

En el Diagrama 10 se presenta el esquema del proceso de digestión anaeróbica, el elemento principal de esta tecnología es el biodigestor donde se produce la reacción bioquímica que genera el biogás como fuente de energía y el digestato como fertilizante. El proceso se lleva a cabo en un reactor conocido como biodigestor anaeróbico, donde se controlan variables como temperatura y pH, en el caso de la temperatura, se pueden utilizar tres rangos; por debajo de 20 °C (Psicrófilo), entre 30 ° y 40 °C (Mesófilo) y entre 50 ° y 70 °C (Termófilo); esto determina la velocidad de crecimiento de las bacterias y, por ende, la velocidad en la producción del biogás. El rango termófilo, es decir entre 50 ° y 70 °C se considera el más económicamente viable, según Mutz et al (2017), aunque requiere mayor control y seguimiento, además a esta temperatura se destruyen patógenos, malas hierbas, huevos y larvas de insectos, mejorando la calidad del digestato (Castells X. E., 2005)

Diagrama 10. Esquema proceso de biodigestión anaerobia



Fuente: Elaborado por el autor basado en EPA (2020) y GEOLINE (2020)

La digestión anaeróbica recibe los siguientes materiales/residuos como materia prima; fracción orgánica de RSU, residuos industriales orgánicos, aguas residuales municipales, residuos, ganaderos y agrícolas, desechos forestales. Estos residuos pueden ser utilizados dentro del biodigestor, cuando se somete a un pretratamiento donde se remuevan las fracciones de residuos inorgánicos, como metales, plásticos, pétreos o vidrios, luego se trituran para lograr un tamaño de partículas consistente y uniforme.

Según el modo de alimentación, los biodigestores se clasifican en continuos o discontinuos. En el sistema discontinuo se llena la cámara con biomasa y se cierra hasta que finalice el tiempo de retención hidráulica (TRH), que dura entre 20 a 60 días. Los biodigestores continuos son más utilizados actualmente, estos no cesan su actividad en ningún momento y tienen un TRH de entre 15 y 25 días.

La digestión anaeróbica tiene ventajas ambientales como la baja emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI), además de tomar un residuo orgánico y convertirlo en dos productos valorizables como lo es el biogás y el digestato, reduciendo la producción de

lixiviados, emisiones en el relleno sanitario y la ocupación de espacio. Una desventaja o limitante a este tipo de tratamiento, es la necesidad de realizar la recolección diferenciada de residuos en las ciudades, para garantizar la calidad y homogeneidad de la materia prima para obtener productos de calidad y de fácil valorización.

2.4. Marco Jurídico

En Colombia las entidades estatales encargadas de atender los temas relativos a la gestión de RSU y la generación de energía corresponden a; el Ministerio de Minas y Energía, y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, apoyándose en sus entidades adscritas como la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

A partir de la Ley 23 de 1973, el Gobierno Nacional a través de sus entidades, crea normas e instrumentos que controlan y previenen la contaminación del medio ambiente y da directrices para la medición y supervisión de las actividades humanas que puedan deteriorarlo, y es, desde esta ley, donde se desprenden aproximadamente 34 documentos normativos entre, leyes, decretos, resoluciones y documentos CONPES, estrategias emitidas por los diferentes ministerios y entidades que intervienen, para regular algunos de los factores ambientales que se verían impactados por un posible proyecto de valorización energética de residuos. Dentro de los temas normativos revisados se consideran; la protección del medio ambiente, gestión de residuos sólidos, servicio público de aseo, emisiones atmosféricas fuentes fijas, energías renovables, y economía circular.

La Tabla 11 presenta con detalle los documentos que contienen la regulación relevante, tanto nacional como distrital, para la implementación de algunas de las tecnologías de valorización energética de residuos.

Tabla 11. Normatividad aplicable a posibles proyectos de valoración energética.

Tipo	#	Año	Emisor	Objeto	Observaciones	Tema
Ley	23	1973	Congreso de Colombia	Por el cual se conceden facultades extraordinarias al presidente de la República para expedir el Código de Recursos Naturales y de Protección al Medio Ambiente y se dictan otras disposiciones	Esta ley es el punto de partida para que el gobierno nacional a través de sus entidades cree instrumentos que controlen y prevengan la contaminación del medio ambiente y da las directrices para la medición y supervisión de las actividades humanas que puedan deteriorarlo.	Protección del medio ambiente
Decreto	2811	1974	Congreso de Colombia	Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.	Se definen responsabilidades del gobierno en cuanto al cuidado y protección del medio ambiente como un patrimonio común. Como objetivo esta prevenir y controlar los efectos nocivos de la explotación de recursos naturales y regular las actividades humanas y su impacto. Dentro de los factores que regula está la atmosfera y los residuos, los cuales están involucrados en el desarrollo de proyectos de recuperación energética de residuos.	Protección del medio ambiente
Ley	9	1979	Congreso de Colombia	Por la cual se dictan medidas sanitarias	Considera “los procedimientos y las medidas que se deben adoptar para la regulación, legalización y control de las descargas de residuos y materiales que afectan o pueden afectar las condiciones sanitarias del Ambiente”.	Gestión de residuos Sólidos
Ley	99	1993	Congreso de Colombia	Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones.	Refiere la necesidad de disponer residuos con el mínimo impacto posible al ambiente y a la salud asegurando su tratamiento antes de ser liberados al medio, así como la necesidad de generar políticas y acciones que induzcan al cambio en los procesos productivos y los patrones de consumo.	Protección del medio ambiente
Ley	142	1994	Congreso de Colombia	Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones.	Se define como servicio público de aseo, la acción de recolectar los residuos sólidos y sobre el cual aplica además lo complementario en relación con su transporte, tratamiento y disposición.	Servicio público de aseo

Decreto	948	1995	Congreso de Colombia	Por el cual se reglamentan, parcialmente la Ley 23 de 1973, los artículos 33, 73, 74, 75 y 75 del Decreto-Ley 2811 de 1974; los artículos 41, 42, 43, 44, 45, 48 y 49 de la Ley 9 de 1979; y la Ley 99 de 1993, en relación con la prevención y control de la contaminación atmosférica y la protección de la calidad del aire.	Contiene el Reglamento de Protección y Control de la Calidad del Aire. Este regula toda actividad que pueda generar algún tipo de emisión atmosférica contaminante. Establece el procedimiento para obtener la licencia respectiva para la operación, así como las multas y medidas sancionatorias en caso de incumplimientos.	Emisiones atmosféricas fuentes fijas
Ley	388	1997	Congreso de Colombia	Modifica la ley 9 de 1989, donde se dictan normas sobre planes de desarrollo municipal, compraventa y expropiación de bienes y se dictan otras disposiciones.	Faculta a los municipios y distritos para establecer las acciones político-organizativas necesarias para planear e implementar el desarrollo de sus territorios en consideración de la utilización, transformación y ocupación del espacio, incluyendo los destinados a la disposición y tratamiento de residuos sólidos.	Sitios de disposición final
Resolución	619	1997	Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial	Por la cual se establecen parcialmente los factores a partir de los cuales se requiere permiso de emisión atmosférica para fuentes fijas.	Esta resolución establece las actividades que están obligadas a solicitar permiso de emisiones atmosféricas.	Emisiones atmosféricas fuentes fijas
Ley	689	2001	Congreso de Colombia	Por la cual se modifica parcialmente la Ley 142 de 1994.	Dentro de las definiciones del artículo 14, agrega actividades complementarias como cortes de césped y poda de árboles, lavado de áreas. Esta definición incluye actividades complementarias como tratamiento y aprovechamiento de residuos.	Emisiones atmosféricas fuentes fijas
Ley	697	2001	Congreso de Colombia	Mediante la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve la utilización de energías alternativas y se dictan otras disposiciones	En el artículo 9 de esta ley, se resalta la promoción del uso de fuentes no convencionales de energías renovables de parte del Ministerio de Minas y Energía.	Energías renovables
Resolución	58	2002	Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial	Por la cual se establecen normas y límites máximos permisibles de emisión para incineradores y hornos crematorios de residuos sólidos y líquidos	El objeto de esta norma es establecer los límites máximos permisibles y requisitos de operación para incineradores de residuos sólidos y líquidos con el fin de mitigar y eliminar el impacto de actividades contaminantes del medio ambiente. Gran parte de los artículos fueron modificados por la resolución 886 de 2004 y algunas definiciones has sido derogadas por el resolución 909 de 2008.	Emisiones atmosféricas fuentes fijas

Decreto	1505	2003	Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial	Por el cual se modifica parcialmente el Decreto 1713 de 2002, en relación con los planes de gestión integral de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones.	Agrega nuevas condiciones a los municipios y distritos que deben ser agregadas a sus Planes Integrales de Gestión de Residuos como la inclusión de población recicladora dentro de las actividades de aprovechamiento de los residuos sólidos.	Gestión de residuos Sólidos
Resolución	886	2004	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial	Por la cual se modifica parcialmente la Resolución número 0058 del 21 de enero de 2002 y se dictan otras disposiciones.	-	Emisiones atmosféricas fuentes fijas
Decreto	838	2005	Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial	Se modifica el Decreto 1713 de 2002 sobre disposición final de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones.	Se adoptan nuevas definiciones relacionadas al manejo de los rellenos sanitarios y establecen criterios y metodología para la localización de áreas para la disposición final de residuos sólidos mediante la tecnología de relleno sanitario.	Sitios de disposición final
Decreto	979	2006	Congreso de Colombia	Por el cual se modifican los artículos 7, 10, 93, 94 y 108 del Decreto 948 de 1995.	Este decreto hace algunas modificaciones al decreto 948 de 1995, entre ellas están las clases de normas de calidad del aire o de los distintos niveles periódicos de inmisión, los niveles de prevención, alerta y emergencia por contaminación del aire, las medidas para la atención de episodios, el contenido del Plan de Contingencia por contaminación atmosférica y la clasificación de "Áreas - fuente" de contaminación	Emisiones atmosféricas fuentes fijas
Decreto	312	2006	Alcaldía Mayor de Bogotá	Por el cual se adopta el Plan Maestro para el Manejo Integral de Residuos Sólidos para Bogotá Distrito Capital	Planificar y reglamenta el Sistema de Saneamiento Básico del Distrito Capital, el cual se aplica a todas las personas que generan, reciclan y aprovechan residuos sólidos ordinarios y especiales y a las entidades públicas y personas o empresas privadas y organizaciones comunitarias y cooperativas vinculadas a la prestación del Servicio Público de Aseo	Servicio público de aseo

Decreto	620	2007	Alcaldía Mayor de Bogotá	Por medio del cual se complementa el Plan Maestro de Residuos Sólidos (Decreto 312 de 2006), mediante la adopción de las normas urbanísticas y arquitectónicas para la regularización y construcción de las infraestructuras y equipamientos del Sistema General de Residuos Sólidos, en Bogotá Distrito Capital	Adopta las normas urbanísticas y arquitectónicas para la regularización y construcción las infraestructuras e instalaciones técnicas para: los rellenos sanitarios, planta de tratamiento de lixiviados, planta de compostaje, disposición final de lodos, planta de incineración para residuos hospitalarios y residuos peligrosos, planta de tratamiento de residuos sólidos hospitalarios y planta de tratamiento de residuos peligrosos, que se localicen en el Distrito Capital	Servicio público de aseo
Resolución	909	2008	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial	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.	A través de esta resolución, el gobierno establece los estándares de emisiones admisibles de contaminantes al aire para fuentes fijas, además de la adopción de los procedimientos para la medición de estas. Además de establecer algunos factores de equivalencia tóxica para dioxinas y furanos, los cuales podría ser emitidos por plantas de WtE.	Emisiones atmosféricas fuentes fijas
CONPES	3530	2008	Consejo Nacional de Política Económica y Social	Lineamientos y estrategias para fortalecer el servicio público de aseo en el marco de la gestión integral de residuos sólidos	En este documento CONPES donde se establecen lineamientos y estrategias para fortalecer el servicio público de aseo, se continuar teniendo como opción de disposición final los rellenos sanitarios, tanto de orden local y regional. No se plantea la inclusión de sistemas de pretratamiento de residuos no aprovechables y su posible uso como fuente de generación de energía.	Servicio público de aseo
Ley	1333	2009	Congreso de Colombia	Por la cual se establece el procedimiento sancionatorio ambiental y se dictan otras disposiciones.	Básicamente esta ley establece todo el procedimiento que se debe tomar cuando alguna de las leyes establecidas en materia ambiental es transgredida. Dentro de este procedimiento también se establece las multas y sanciones a las que se expone quien falte a las normas de cuidado del medio ambiente.	Sanciones por incumplimiento
Resolución	760	2010	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial	Por la cual se adopta el protocolo para el control y vigilancia de la contaminación atmosférica generada por fuentes fijas.	-	Emisiones atmosféricas fuentes fijas

Resolución	2153	2010	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial	Por la cual se ajusta el Protocolo para el Control y Vigilancia de la Contaminación Atmosférica Generada por Fuentes Fijas, adoptado a través de la Resolución 760 de 2010 y se adoptan otras disposiciones.	-	Emisiones atmosféricas fuentes fijas
Decreto	621	2010	Alcaldía Mayor de Bogotá	Por medio del cual se modifica el Decreto Distrital 620 de 2007 que complementó el Plan Maestro de Residuos Sólidos y se dictan otras disposiciones	Modifica los Subsistemas del servicio público de aseo y de reciclaje y aprovechamiento de residuos sólidos ordinarios. Establece que la Administración Distrital reglamentara las infraestructuras, instalaciones técnicas y equipamientos destinados a los procesos de tratamiento aprovechamiento y/o valorización de residuos sólidos orgánicos ordinarios generados en la ciudad, en espacio público y privado, con base en los estudios específicos que realice la UAESP	Servicio público de aseo
Resolución	935	2011	IDEAM	Por la cual se establecen los métodos para la evaluación de emisiones contaminantes por fuentes fijas y se determina el número de pruebas o corridas para la medición de contaminantes en fuentes fijas	-	Emisiones atmosféricas fuentes fijas
Resolución	799	2012	UAESP	Por la cual se establece el listado detallado los materiales reciclables y no reciclables para la separación en la fuente de los residuos sólidos domésticos en el distrito capital	A través de esta resolución se definen los listados de residuos que se encuentran en la ciudad de Bogotá, proporcionando los grupos principales como el Material Potencialmente Reciclable (MPR) y los Residuos Ordinarios (RO) los cuales no son susceptibles de ser aprovechados y, por ende, son direccionados al relleno sanitario. Estos últimos son los que se llevarían a plantas de aprovechamiento energético de residuos.	Gestión de residuos Sólidos

Decreto	2981	2013	Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial	Por el cual se reglamenta la prestación del servicio público de aseo.	Deroga el decreto 1713 de 2002. Este decreto debe ser tenido en cuenta, ya que regula el servicio público de aseo y establece parámetros claros en cuanto al aprovechamiento y la inclusión de población recicladora. Este decreto no aplica la actividad de disposición final, regulada por el decreto 838 de 2005. Un proyecto de valorización energética de residuos haría parte de un esquema de servicio público de aseo, que debería entrar a regularse en el marco de este decreto. Este decreto entra a hacer parte del decreto 1077 de 2015.	Servicio público de aseo
Ley	1715	2014	Congreso de Colombia	Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional	Esta ley la primera iniciativa formal del gobierno nacional para promover el desarrollo y el uso de las fuentes no convencionales de energía, en especial las renovables. Dentro de los fines de esta ley está el orientar políticas públicas para la generación de incentivos tributarios que estimulen estos proyectos. Además de abrir la puerta al sector público y privado para la ejecución de proyectos conjuntos. En su artículo 18, establece las bases para la generación de energía a través de residuos.	Energías renovables
Licencia	1351	2014	Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR	Por medio de la cual se modifica la licencia ambiental única otorgada para el proyecto relleno sanitario Doña Juana y se toman otras determinaciones.	A través de una revisión del proyecto del relleno sanitario Doña Juana, se establece un plazo para la construcción de obras que lleven al cierre de la fase 2 de Optimización de la Zona VII hacia el primer trimestre de 2022	Licencia Ambiental
Decreto	2143	2015	Ministerio de Minas y Energía	Por el cual se adiciona el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía, 1073 de 2015, en lo relacionado con la definición de los lineamientos para la aplicación de los incentivos establecidos en el Capítulo 111 de la Ley 1715 de 2014.	Este decreto agrega un nuevo capítulo al Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía, donde se relaciona todo lo referente a las fuentes no convencionales de energías renovables, que se establecieron en la Ley 1715 de 2014 en cuanto a los incentivos tributarios para los proyectos FNCER.	Energías renovables
Resolución	1283	2016	Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible	Por la cual se establece el procedimiento y requisitos para la expedición de la certificación de beneficio ambiental por	Para poder acceder a los beneficios tributarios es necesario obtener un certificado ambiental emitido por el ministerio del medioambiente, esta	Energías renovables

				nuevas inversiones en proyectos de fuentes no convencionales de energías renovables - FNCER y gestión eficiente de la energía, para obtener los beneficios tributarios de que tratan los artículos 11, 12, 13 y 14 de la Ley 1715 de 2014 y se adoptan otras determinaciones	resolución define el procedimiento para obtener este certificado.	
CONPES	3874	2016	Consejo Nacional de Política Económica y Social	Política nacional para la gestión integral de residuos sólidos	En este documento CONPES aborda explícitamente la necesidad de desarrollar instrumentos para promover el tratamiento de residuos sólidos con fines de valorización como la generación de energía eléctrica, esto en el marco de la promoción de la económica circular.	Gestión de residuos Sólidos
Decreto	596	2016	Ministerio de vivienda, ciudad y territorio	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 agrega al decreto 1077 de 2015 todo lo relacionado con la inclusión de la población recicladora de las regiones y la regulación de todo lo relacionado con la actividad de aprovechamiento de residuos en las ciudades.	Servicio público de aseo
Decreto	495	2016	Alcaldía Mayor de Bogotá	Por el cual se adopta el Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos - PGIRS- del Distrito Capital, y se dictan otras disposiciones	Establece el PGIRS como el instrumento de planeación distrital contentivo de los objetivos, metas, programas, proyectos, actividades y recursos para el manejo de los residuos sólidos, basado en la política de gestión integral de los mismos. La coordinación general del PGIRS está a cargo de la UAESP.	Gestión de residuos Sólidos
Resolución	330	2017	Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio	Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS y deroga las resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 y 2320 de 2009	EL capítulo 6 de esta resolución, indica los requisitos para el diseño de los esquemas de aseo en las ciudades y municipios. Dentro de este capítulo, el artículo 225 abre la puerta a sistemas de incineración con recuperación de energía	Servicio público de aseo

Resolución	330	2017	Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial	Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS y se derogan las resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 y 2320 de 2009	Reglamenta los requisitos técnicos que se deben cumplir en las etapas de diseño construcción, puesta en marcha, operación, mantenimiento y rehabilitación de la infraestructura relacionada con los servicios públicos de acueducto, alcantarillado y aseo. En el artículo 225 da instrucciones para la inclusión de sistemas de incineración con recuperación energética en los esquemas de aseo de las ciudades o municipios.	Servicio público de aseo
Resolución	703	2018	UPME	Por la cual se establecen el procedimiento y los requisitos para obtener la certificación que avala los proyectos de Fuentes No Convencionales de Energía (FNCE), con miras a obtener el beneficio de la exclusión del IVA y la exención de gravamen arancelario de que tratan los artículos 12 y 13 de la Ley 1715 de 2014, y se adoptan otras disposiciones	Esta resolución establece todos los parámetros para que el proyecto sea certificado como FNCER y así poder acceder al beneficio tributario establecido en el artículo 174 de la Ley 1955 de 2019.	Energías renovables
Resolución	2267	2018	Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible	Por la cual se modifica la Resolución 909 de 2008 y se adoptan otras disposiciones.	En las modificaciones a la resolución 909 de 2008 esta una realizada al artículo 102 el cual especifica los residuos que pueden ser utilizados en tratamientos térmicos como la incineración de residuos y el coprocesamiento	Emisiones atmosféricas fuentes fijas
CONPES	3934	2018	Consejo Nacional de Política Económica y Social	Política de Crecimiento Verde	Objetivo general: Impulsar a 2030 el aumento de la productividad y la competitividad económica del país, al tiempo que se asegura el uso sostenible del capital natural y la inclusión social, de manera compatible con el clima. Dentro de las líneas de acción no está explícitamente dicho la promoción de proyectos de valorización energética, pero si contempla actividades de tratamiento de residuos alineadas con el CONPES 3874 de 2016 y avanzar en la implementación de proyectos que promuevan la economía circular.	Economía Circular

Documento	-	2018	UAESP	Documento técnico de soporte propuesta modificación decreto distrital no. 620 de 2007	Documento técnico que presenta argumentos para realizar modificaciones en el Plan Maestro de Residuos Sólidos, en especial sobre la optimización del relleno sanitario doña Juana con el propósito de ampliar su vida útil.	Servicio público de aseo
Decreto	652	2018	Alcaldía Mayor de Bogotá	Por medio del cual se ajustan los datos de línea base contenidos en el Documento Técnico de Soporte - DTS del Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos —PGIRS, Decreto Distrital 495 del 11 de noviembre de 2016	Debido a las modificaciones y avances en diferentes aspectos relacionados con la prestación del servicio público de aseo en la ciudad y las dinámicas propias de crecimiento y de ocupación del territorio, se han generado cambios en los datos de referencia para la construcción de la sección de "línea base" contenida en el Documento Técnico de Soporte - DTS del PGIRS anexo al Decreto Distrital 495 de 2016; datos que, por lo mismo, requieren ser ajustados a la realidad para, ajustar la operación del servicio a las necesidades actuales del Distrito Capital.	Gestión de residuos Sólidos
Ley	1955	2019	Congreso de Colombia	Por el cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo 2018 – 2022. "Pacto por Colombia, pacto por equidad".	En el plan de desarrollo 2018-2022 en el artículo 174 se modifica el artículo 11 de la ley 1715 de 2014, en donde se entrega un incentivo tributario, en este se otorga el derecho de deducir del impuesto de renta el 50% del total de la inversión realizada en un periodo de 15 años, contados a partir del año gravable siguiente a la puesta en operación de la inversión.	Energías renovables
Estrategia Nacional de Economía Circular		2019	Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible	Cierre de ciclos de materiales, innovación tecnológica, colaboración y nuevos modelos de negocio	Esta estrategia promueve el emprendimiento, la generación de valor agregado y la atracción de la inversión como resultado de nuevas formas de producción, consumo y aprovechamiento de desechos, que reduzcan la carga sobre los rellenos sanitarios, lo que cobra gran importancia teniendo en cuenta que la vida útil de los rellenos sanitarios de 321 municipios de Colombia se acabará en cinco años, según en DNP.	Economía Circular

Fuente: Elaboración propia (2020)

2.5. El análisis multicriterio como soporte para la toma de decisiones

La toma de decisiones con base en análisis multicriterio permite considerar específicamente los diferentes puntos de vista en consideración de los aspectos positivos y negativos al establecer una elección (Daniel Butchart-Kuhlmann, Kralisch, Fleischer, Meinhardt, & Brenning, 2018, pág. 472) citando a Sadok y otros (2008), refieren que el análisis de decisión multicriterio corresponde a “un proceso recursivo no lineal que incluye cuatro pasos principales: (i) estructurar el problema de decisión, (ii) articular y modelar las preferencias, (iii) agregar las evaluaciones alternativas (preferencias), y (iv) hacer recomendaciones”. Existen diversos métodos de análisis de decisiones multicriterio que pueden ser agrupados considerando el enfoque de agregación completa o escuela estadounidense y el enfoque de rango superior, o escuela francesa. La escuela de pensamiento norteamericana refiere métodos basados en la utilidad y en esta se destacan el Análisis Jerárquico Multicriterio (AHP, por sus siglas en inglés), la Ponderación Aditiva Simple (SAW, por sus siglas en inglés) y la Técnica de Ponderación Multiatributo Simple (SMART, por sus siglas en inglés); por otro lado está la escuela europea que se enfoca en métodos sobre calificación, y refiere los métodos PROMETHEE y ELECTRE (Yajure, C., y Guzmán, Y, 2017)

Por su parte Aznar, J. y Guijarro, F, (2012, pág. 21) resaltan la utilidad del análisis multicriterio indicando la posibilidad de superar el hecho de que el ser humano tome decisiones basado en optimizar solamente una variable, actuando bajo la necesidad de maximizar una única función de utilidad, por medio del método resulta posible asumir una elección teniendo en cuenta diferentes objetivos a la vez y estos no necesariamente son compatibles entre sí, la toma de decisión logra un determinado nivel en cada uno de los diferentes objetivos, siendo entonces más alineado con un contexto en donde existe diversidad de variables a considerar.

A través del análisis multicriterio es posible organizar los elementos involucrados en una toma de decisión compleja para estructurar el problema, conformando un juicio sobre dos criterios al compararlos entre sí en relación con el ideal planteado, de este se espera; “i) de manera práctica tratar cuantitativamente con diferentes tipos de relaciones funcionales en una red compleja y ii) una herramienta poderosa para integrar hacia delante y hacia atrás la planeación de manera interactiva considerando los juicios de los tomadores de decisión” (Saaty, T, 2013, pág. 1102).

Los análisis multicriterio son especialmente utilizados para la toma de decisiones en temas que involucran aspectos intangibles para evaluar, estos no limitan la toma de decisión a una única solución óptima y permiten establecer un orden global a un grupo de alternativas desde la más preferida hasta la menos preferida, por lo tanto las opciones posiblemente diferirán en el logro de los objetivos planteados y ninguna de ellas será la mejor en el alcance de todos los objetivos (Yajure, C., y Guzmán, Y, 2017, pág. 274), en suma con su aplicación resulta posible; seleccionar las mejores alternativas, aceptar alternativas que parecen “buenas” y descartar las que parecen “malas”, y generar un ranking de las alternativas de solución planteadas de la mejor hasta la peor. Una forma de clasificar la decisión multicriterio se da en función de las alternativas a considerar en la toma de decisión, aquellos que vinculan un número infinito de alternativas son reconocidos como métodos de decisión multiobjetivo y los que involucran opciones de decisión finitas son los métodos de decisión multicriterio discretos.

Los métodos de Decisión Multicriterio Discreta se utilizan para realizar una evaluación y decisión respecto de problemas que, por naturaleza o diseño, admiten un número finito de alternativas de solución, a través de:

- 1) Un conjunto de alternativas estable, generalmente finito (soluciones factibles que cumplen con las restricciones- posibles o previsibles); se asumen que cada una de ellas es perfectamente identificada, aunque no son necesariamente conocidas en forma exacta y completa todas sus consecuencias cuantitativas y cualitativas;
- 2) Una familia de criterios de evaluación (atributos, objetivos) que permiten evaluar cada una de las alternativas (analizar sus consecuencias), conforme a los pesos (o ponderaciones) asignados por el agente decisor y que reflejan la importancia (preferencia) relativa de cada criterio;
- 3) Una matriz de decisión o de impactos que resumen la evaluación de cada alternativa conforme a cada criterio; una valoración (precisa o subjetiva) de cada una de las soluciones a la luz de cada uno de los criterios; la escala de medida de las evaluaciones puede ser cuantitativa o cualitativa, y las medidas pueden expresarse en escalas cardinal (razón o intervalo), ordinal, nominal, y probabilística;
- 4) Una metodología o modelo de agregación de preferencias en una síntesis global; ordenación, clasificación, partición o jerarquización de dichos juicios para determinar la solución que globalmente recibe las mejores evaluaciones;
- 5) Un proceso de toma de decisiones (contexto de análisis) en el cual se lleva a cabo una negociación consensual entre los actores o interesados (analista- “experto”-, decisor y usuario)” (Ávila, R, 2000, pág. 10)

En la toma de decisiones resulta conveniente contar con la inclusión de un entorno amplio que vincule diversidad de objetivos y contradicciones, lo cual es posible de lograr con técnicas de evaluación multicriterio pues permiten de manera simultánea involucrar diferentes criterios, asignar la importancia relativa de cada uno y considerar varias

alternativas de solución, de acuerdo con Pacheco y Contreras (2008, pág. 17), resultan útiles para analizar alternativas en las etapas de prefactibilidad de los proyectos cuando los estudios para su ejecución evidencian altos costos, y sin embargo advierten que tales técnicas no sustituyen las evaluaciones económicas determinadas por medio del valor presente neto (VPN) y la tasa interna de retorno (TIR) pues son indicadores a considerar necesariamente antes de la implementación de un proyecto. Con el uso del análisis multicriterio es posible lograr una visión más precisa comprendiendo mejor el fenómeno estudiado gracias a la descomposición del problema en criterios y subcriterios brindando la posibilidad de incluir datos cualitativos y cuantitativos ofreciendo una mejor perspectiva del análisis (Pacheco, J., y Contreras, E., 2008, pág. 37).

Ahora bien, tal como se menciona previamente existen diversidad de métodos de análisis multicriterio y uno de ellos es el método de Análisis Jerárquico Multicriterio (AHP, por sus siglas en inglés), corresponde a uno de decisión discreto y se desarrolla en el marco de la escuela de pensamiento norteamericana. En los años 60 Thomas Saaty quien fue el pionero del Análisis Jerárquico Multicriterio, se encontraba dirigiendo investigaciones para la Agencia de Control de Armas y Desarme de los Estados Unidos contaba con presupuesto y la disponibilidad de prestantes teóricos y economistas de talla mundial, sin embargo, estuvo insatisfecho con los resultados de su investigación debido a que evidenció que las teorías y modelos científicos aplicados resultaban generalistas y no atendían las necesidades particulares de un intercambio de armas en los Estados Unidos haciendo difícil ponerlo en práctica. Es allí en donde observa la falta de un enfoque sistemático y práctico que permitiera establecer prioridades para soportar la toma de decisiones, en años posteriores mientras enseñaba en Wharton School continuó motivado por desarrollar una manera simple para ayudar a los tomadores de decisión en su labor y propuso el modelo de Análisis Jerárquico Multicriterio en la década de los ochenta, como la herramienta que contribuiría a la toma de decisiones complejas. (Forman, E. & Gass, S, 2001, pág. 470)

Es un método que organiza los factores de decisión en una estructura jerárquica y sobre estos, los expertos o tomadores de decisión realizan juicios de dos en dos (comparaciones binarias) estableciendo el factor dominante sobre una propiedad común, así resultan vectores de prioridad que se combinan en toda la estructura jerárquica para tomar una decisión (Saaty, T, 2013, pág. 1101), con el AHP el tomador de decisiones consigue asumir su tarea utilizando consejos sin eliminar definitivamente su posición

inicial frente a las alternativas, se le atribuye un alto grado de confiabilidad al poner en conocimiento un ranking de prioridades configurándose en una herramienta de apoyo importante, "el AHP convierte las preferencias individuales en pesos de escala de razón que se combinan con los pesos aditivos lineales para las alternativas asociadas. Estas ponderaciones resultantes se utilizan para clasificar las alternativas y así ayudar al tomador de decisiones a tomar una decisión o pronosticar y obtener resultados" (Forman, E. & Gass, S, 2001, pág. 469). Este es quizá uno de los métodos multicriterio mayormente aplicados en áreas como; sistemas de información, cadena de valor, servicios públicos, salud, estrategia. E-learning, defensa, puertos marítimos, manufactura, (Ishizaka, A., Balkenborg, D., & Kaplan, T, 2011, pág. 1811), formulación de políticas, priorización de carteras de proyectos, gestión ambiental, análisis costo beneficio, formulación de estrategias de mercado, entre otros. (Ávila, R, 2000, pág. 11).

Para la toma de decisión por medio de AHP es necesario descomponer el problema siguiendo los siguientes pasos (Yajure, C., y Guzmán, Y, 2017, pág. 275):

1. Definir el problema
2. Plantear una estructura jerárquica partiendo de la meta que se pretende alcanzar, para después plantear los criterios y subcriterios que influyen en la toma de decisión y vincular las alterativas con las cuales se lograría la meta
3. Elaborar el conjunto de matrices de comparación binarias, teniendo en cuenta que cada elemento de un nivel superior se usa para comparar los elementos en el nivel inmediatamente inferior con respecto a él y esta acción se realiza por medio de una escala numérica con la cual es posible plantear cuantas veces es preferible un elemento sobre otro en referencia al criterio con el que se están comparando, tal escala corresponde a la escala de valores fundamentales que se muestran en la Tabla 12 (Saaty, T, 2013, pág. 1104).

Tabla 12. Escala fundamental de números absolutos

Intensidad de importancia	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Los dos criterios contribuyen igual al objetivo
2	Más débil que ligero	
3	Moderada importancia	La experiencia y el juicio otorgan una importancia ligeramente mayor a favor de un criterio sobre el otro para contribuir al objetivo
4	Más que moderado	
5	Fuerte importancia	La experiencia y el juicio otorgan una importancia fuerte a favor de un criterio sobre el otro para contribuir al objetivo
6	Más que fuerte	
7	Importancia muy fuerte o demostrada	Un criterio es fuertemente favorecido con respecto al otro para contribuir al objetivo
8	Muy, muy fuerte	
9	Importancia extrema	La evidencia favorece un criterio sobre el otro para contribuir al objetivo, es el más alto orden posible de afirmación

Fuente: Saaty, T (2013, pág. 1104)

4. Una vez obtenidas las prioridades de las comparaciones, se utilizarán para pesar prioridades del nivel inmediatamente inferior, esta acción se realizará consecutivamente hasta obtener las prioridades finales de la alternativa en el nivel más bajo de la jerarquización
5. Con la matriz de priorizaciones de comparaciones pareadas construida se generan los pesos de importancia relativa mediante la técnica de auto vector, para así calcular el índice de consistencia de cada comparación de manera que sea posible asegurar que no exista contradicción entre los juicios emitidos en el análisis.
6. Finalmente, cada peso de cada alternativa se multiplica con los criterios considerados y se obtiene la puntuación de cada una para así proceder a establecer un ranking y determinar la mejor opción para la toma de decisión.

CAPITULO 3 – METODOLOGÍA

El enfoque metodológico de la investigación es de tipo mixto, por medio de esta y de manera secuencial “*En una primera etapa recolectas y analizas datos cuantitativos o cualitativos, y en una segunda fase recabas y analizas datos del otro método*” (Hernández, R., Mendoza, C, 2018, pág. 627), se dará a conocer la posibilidad de implementar una alternativa de valorización energética de RSU para la ciudad de Bogotá, contando inicialmente con información de contexto para después facilitar el análisis e interpretación de los datos disponibles, en un diseño exploratorio (Hernández, R., Mendoza, C, 2018).

Se iniciará con una fase cualitativa describiendo diferentes alternativas de valorización energética de residuos, se caracterizará los RSU que se generan en la ciudad de Bogotá, estableciendo además su potencial de valorización energética, para posteriormente referir el marco legal y las regulaciones nacionales vigentes para proyectos de valorización energética de residuos; finalmente se abordará el componente cuantitativo de la investigación implementando un análisis multicriterio que permitirá determinar una alternativa teórica de valorización energética para la ciudad de Bogotá. A continuación, se refiere el desarrollo metodológico de cada uno de los objetivos específicos previamente referidos.

3.1. Describir alternativas valorización energética de residuos sólidos

Describir alternativas valorización energética de residuos sólidos, en consideración de los aspectos relativos a procesamiento, tipo de residuos que transforma, costos de capital y de operación y mantenimiento, emisiones atmosféricas, capacidad para reducir el volumen de los RSU, tipo de energía que produce, necesidades de preprocesamiento, y eficiencia de la tecnología.

La descripción correspondiente a las diferentes alternativas de valorización energética de residuos será abordada en consideración de lo siguiente.

- a) Recopilación y análisis de documentos de investigación relativos a tecnologías de valorización energética de residuos, incluyendo además casos de estudio y aquellos que ofrecen lineamientos y recomendaciones para la implementación de este tipo de tecnologías.

- b) Clasificación de los documentos y de la información disponible de acuerdo con las temáticas abordadas, esta clasificación se detallará utilizando los campos planteados en la Tabla 13.

Tabla 13. Parámetros de revisión de información secundaria disponible

Título del Documento	Autor	Año/País	Síntesis – Información general disponible en el documento	TVER	EdI	LyR

TVER: Tecnologías de valorización energética de residuos.
EdI: Experiencias de implementación
LyR: Lineamientos y recomendaciones

Fuente: Elaboración propia (2020)

- c) Definición de aspectos a considerar para la descripción

Basado en que, “ el objetivo de la muestra cualitativa es seleccionar casos que contribuyan al entendimiento a profundidad de un fenómeno y aprender de este” (Hernández, R., Mendoza, C, 2018, pág. 434), y partiendo de la clasificación previa se procede a seleccionar los documentos que brindan información que permita describir las alternativas de valorización energética de residuos en consideración las temáticas que a continuación se refieren, para posteriormente diligenciar por cada una de ellas una tabla como la presentada en la Tabla 14.

Tabla 14. Descripción de alternativas de valorización energética de RSU

ASPECTO PARA CONSIDERAR	EXPLICACIÓN DEL ASPECTO
Descripción tecnológica	Refiere la descripción general del funcionamiento de la alternativa
Proceso	Indica el proceso que cada alternativa desarrolla para valorizar energéticamente los residuos
Tipo de residuos que transforma	Establece cuales son los residuos que la alternativa tiene la posibilidad de gestionar para generar energía
Costos de capital	Correspondiente al valor en el cual se incurriría para el montaje y puesta en marcha de la alternativa de valorización energética de RSU. (activos de capital)
Costo de operación y mantenimiento	Hace referencia al valor monetario correspondiente a las necesidades de mantenimiento y operación que tiene la alternativa para procurar su funcionamiento óptimo, este es un costo permanente
Emisiones atmosféricas	Correspondiente a aquellas liberaciones de materias o sustancias sobre la atmosfera provenientes de las actividades naturales o antropogénicas., entre las que se pueden referir, el material particulado - MP, los óxidos de azufre SOx, los óxidos de nitrógeno NOx, el monóxido de carbono CO (contaminantes criterio) y el dióxido de carbono CO2, los metales pesados, las dioxinas, los furanos, las sustancias generadoras de olores ofensivos y el ruido, que también revisten interés
Capacidad de reducir el volumen de RSU a disponer	Hace referencia a la posibilidad que tiene la tecnología de valoración energética de disminuir el volumen de RSU que serán sujetos a disposición final
Tipo de energía que produce	Corresponde al tipo de energía que tiene la capacidad de recuperar la implementación de la alternativa de valorización energética, esta puede ser en forma de calor electricidad o combustibles alternos
Necesidades de preprocesamiento de RSU	Establece la necesidad implementar o no un tratamiento previo a los RSU para ser utilizados en su procesamiento energético.
Eficiencia de la alternativa	Establece el porcentaje de eficiencia de la alternativa para generar energía

Fuente: Elaboración propia (2020)

3.2. Recabar información en relación con los RSU de la ciudad de Bogotá.

La composición de los residuos de acuerdo con Moratorio, Rocco y Castelli (2012, pág. 117), se configura en un elemento fundamental para establecer el potencial de generación energética de los mismos, de manera que para obtener la caracterización de los residuos sólidos en la ciudad de Bogotá, partiendo de información secundaria disponible se abordará lo siguiente.

- 1) Clasificación del tipo de RSU generados en la ciudad en consideración de las siguientes categorías: materia orgánica, plásticos cartón, papel, textiles, vidrio, metales, cerámica, cuero, hueso, ladrillo, madera, minerales y otros
- 2) Basado en las anteriores categorías y en información secundaria disponible se recopilarán y consolidarán datos de la composición fisicoquímica de los RSU generados en la ciudad de Bogotá considerando las siguientes variables: Poder Calorífico Inferior (PCI) Poder Calorífico Superior (PCS)
- 3) Se establecerá el potencial de generación energética de los RSU generados en Bogotá, a partir de la siguiente fórmula, retomada de Moratorio, Rocco y Castelli (2012, pág. 119).

$$CERSU = VRSUBta \left(\frac{Kg}{día} \right) * \frac{PCI}{Kg} * \frac{1día}{86400 seg}; \text{ Dónde:}$$

CERSU: Contenido de energía de RSU

VRSUBta: Volumen de RSU generados en la ciudad de Bogotá diariamente

PCI: Poder Calorífico Inferior.

3.3. Seleccionar una alternativa de valorización energética para el manejo de los RSU en la ciudad de Bogotá

La definición de la alternativa teórica de valorización energética de RSU para la ciudad de Bogotá se configura en un proceso complejo al momento de tomar una decisión al respecto, es necesario contemplar diversos factores que propendan por un balance entre los aspectos económicos, sociales y ambientales, buscando un escenario que contribuya al desarrollo sostenible en el marco de satisfacer la necesidad de gestionar los RSU de la ciudad sin comprometer los recursos que en el futuro las generaciones venideras requerirán para satisfacer sus propias necesidades. De acuerdo con Cruz y Ojeda (2013) es necesario promover la gestión de los residuos, vinculando su manejo de forma integral al considerar las diferentes opciones que permitan generar prácticas cíclicas que los reincorporen a las cadenas productivas, minimizando así la disposición final.

Basado en el principio de jerarquía para el manejo de los residuos presentado en el Diagrama 4, la valorización energética se configura en una opción de manejo previo a la disposición final aportando al hecho de reducir la cantidad de RSU destinados a dicha disposición, además logrando por medio de un proceso de transformación la reincorporación al sistema de la fracción energética de tales residuos.

Ahora bien, tal como previamente se ha indicado la cuestión que trata esta investigación es plantear una alternativa en el marco de la recuperación energética, por tanto, se propone el desarrollo de un instrumento de proceso de análisis jerárquico (AHP por sus siglas en inglés Analytic Hierarchy Process) que permita soportar la selección de una de las alternativas planteadas en consideración de múltiples criterios enmarcados en la triada de la sostenibilidad desde los aspectos ambientales se incluyen algunos asociados a emisiones atmosféricas y generación de residuos; desde los aspectos económicos se vinculan los asociados a costos de inversión y de operación; desde lo social, se consideran temas relacionados a la aceptación social y la especialidad de mano de obra y desde lo técnico información asociada al funcionamiento de la alternativa . El Diagrama 11 se elabora teniendo en cuenta el Manual metodológico de evaluación multicriterio para programas y proyectos del Instituto Latinoamericano de Planificación Económica y Social – ILPES (2008), allí se puede observar de manera esquemática el paso a paso que se implementará para abordar el análisis multicriterio.

Diagrama 11. Procedimiento para desarrollar el análisis multicriterio



Fuente: Elaborado por el autor, basado en ILPES (2008) y Guevara, D., Osorio, J., y Manyoma, P (2013)

3.3.1. Definición del problema

La definición del problema corresponde a determinar el objetivo por el cual se está abordando el Análisis Jerárquico Multicriterio, representa lo que se espera resolver y se configura en la base del desarrollo del esquema jerárquico conformado por, objetivo, criterios, subcriterios y alternativas. (ILPES, 2008, pág. 49). Este objetivo corresponde al determinado por los elaboradores de la monografía y corresponde al planteado en este documento en consideración de la problemática evidenciada.

3.3.2. Definición de criterios

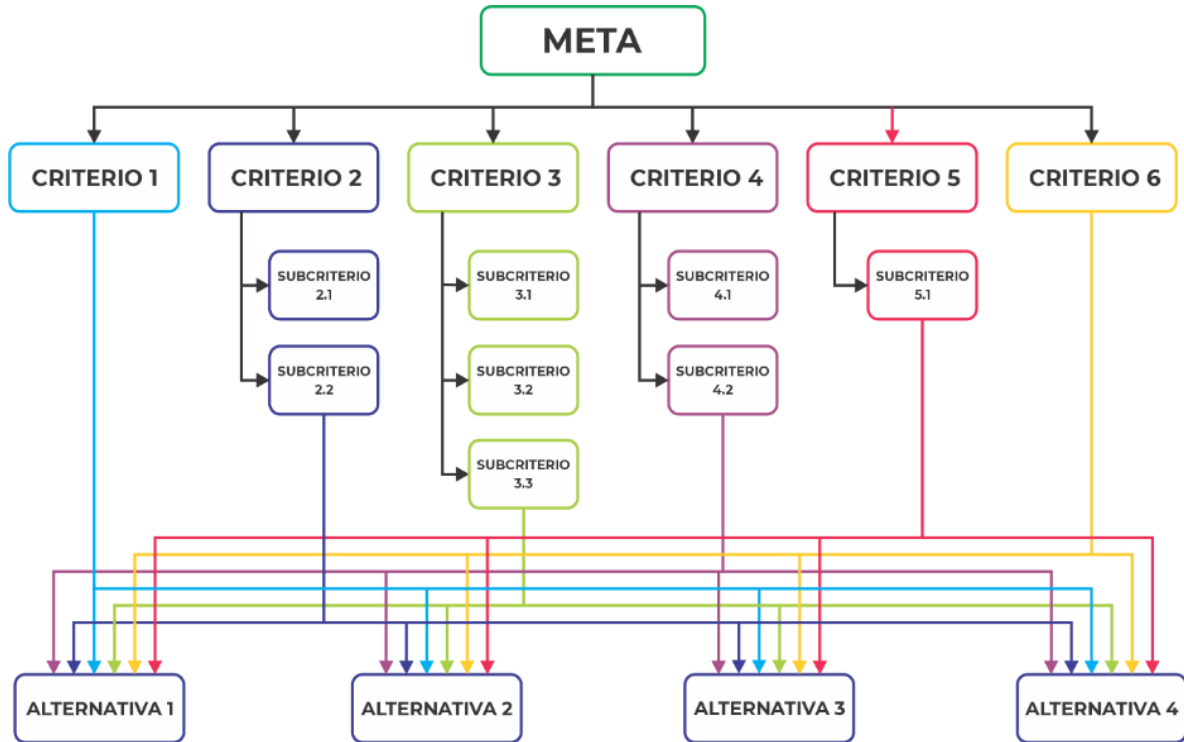
Los criterios serán los aspectos que conducen al logro del objetivo principal, dan cuenta de las dimensiones relevantes que conllevan al logro del objetivo, para el contexto de esta investigación se enmarcan en la sostenibilidad, estos a su vez contarán con subcriterios que los definen (ILPES, 2008, pág. 44).

3.3.3. Identificación de alternativas

Corresponden a las diferentes soluciones o acciones planteadas para dar alcance al objetivo principal (ILPES, 2008, pág. 44). El desarrollo de los tres pasos anteriores se consolida por medio de un esquema como el presentado en el Diagrama 12, este se

configura en el Esquema Jerárquico, por medio del cual y en consideración de los criterios e indicadores será posible seleccionar la alternativa que mejor satisfaga el objetivo determinado (ILPES, 2008, pág. 50)

Diagrama 12. Esquema Jerárquico



Fuente: Elaborado por el autor, con base en ILPES (2008)

3.3.4. Evaluación de alternativas

La evaluación de alternativas procede al iniciar con la selección de un grupo de experto quienes participaran emitiendo sus juicios en consideración de su conocimiento y experiencia para abordar el ejercicio de priorización estableciendo la importancia relativa de los criterios con respecto a los demás considerados, para posteriormente proceder con los juicios de valor y las evaluaciones.

3.3.4.1. Selección de grupo de expertos

Se determina el grupo de expertos considerando diferentes sectores relacionados como energía renovable, gestión de residuos, sostenibilidad para ofrecer su concepto en relación con el análisis referido procurando vincular a personas con conocimientos y experiencia en relación con la problemática planteada. Esta diversidad en cuanto a los expertos consultados puede afectar positivamente la credibilidad y reducir la incertidumbre del estudio (Almanaseer, Bassim Abbassi, Friesen, & Nestico-Semianiw, 2020).

3.3.4.2. Importancia de los criterios

Se asigna la importancia relativa de los criterios en consideración de una escala de priorización que refleja cuál de ellos aporta en mayor medida al logro de la sostenibilidad en la gestión de los RSU en la ciudad de Bogotá. Cada criterio obtendrá un puntaje y la sumatoria de los mismos deberá ser igual a uno ya que representa el porcentaje total distribuido entre los diferentes criterios, a continuación, en la Tabla 15, se refiere tal ejercicio a manera de ejemplo.

Tabla 15. Ejemplo de la importancia de los criterios

CRITERIOS	Todos los criterios son igual de importantes	Se prioriza el criterio 1	Se prioriza el criterio 2	Se prioriza el criterio 3
Criterio 1	0,33	0,5	0,25	0,25
Criterio 2	0,33	0,25	0,5	0,25
Criterio 3	0,33	0,25	0,25	0,5
Total	1	1	1	1

Fuente: Elaboración propia (2020)

3.3.4.3. Juicios de valor y evaluaciones

Con los criterios definidos y priorizados, y con un panel de expertos establecido se procede a realizar el análisis por pares en donde los expertos expresan sus opiniones abordando comparaciones binarias en consideración de cada criterio, subcriterio y alternativas planteadas y que se sustenta en la información científica y técnica conocida el grupo evaluador en consideración de su experiencia.

Cada miembro del panel reflejara su preferencia asignando un valor numérico que correspondiente a su recomendación en consideración de la siguiente escala, definida por Saaty y consolidada en la Tabla 16.

Tabla 16. Escala de Saaty

ESCALA	DEFINICIÓN	EXPLICACIÓN
1	Ambos son de igual importancia.	Contribuyen de igual forma al objetivo
3	Moderada importancia de un elemento sobre otro.	La experiencia y el juicio favorecen levemente a un criterio sobre el otro
5	Importancia fuerte	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente a un criterio sobre el otro
7	Muy fuerte o demostrada	Un criterio es mucho más favorecido que el otro; su predominancia se demostró en la práctica
9	Extrema	La evidencia que favorece un criterio sobre el otro es absoluta y totalmente clara.
2, 4, 6, 8	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes.	Usados como valores de consenso entre dos juicios
Recíprocos	$a_{ij}=1/a_{ji}$	Hipótesis del método

Fuente: Saaty, T (1994)

El proceso se repite hasta agotar todas las comparaciones de los componentes; criterios, subcriterios y alternativas). A continuación, de la Tabla 17 a la Fuente: Elaboración propia (2020)

Tabla 22 se presenta el desarrollo del proceso en consideración del esquema jerárquico planteado en el Diagrama 12.

Tabla 17. Ejemplo de comparación de subcriterios con respecto a criterio 1

CRITERIO 1	Subcriterio 1.1	Subcriterio 1.2	Subcriterio 1.n
Subcriterio 1.1	1	Subcriterio 1.1 / Subcriterio 1.2	Subcriterio 1.1 / Subcriterio 1.n
Subcriterio 1.2	Subcriterio 1.2 / Subcriterio 1.1	1	Subcriterio 1.1 / Subcriterio 1.n
Subcriterio 1. n	Subcriterio 1.n / Subcriterio 1.1	Subcriterio 1.n / Subcriterio 1.2	1

Fuente: Elaboración propia (2020)

Tabla 18. Ejemplo de comparación de subcriterios con respecto a criterio 2

CRITERIO 2	Subcriterio 2.1	Subcriterio 2.2	Subcriterio 2.n
Subcriterio 2.1	1	Subcriterio 2.1 / Subcriterio 2.2	Subcriterio 2.1 / Subcriterio 2.n
Subcriterio 2.2	Subcriterio 2.2 / Subcriterio 2.1	1	Subcriterio 2.1 / Subcriterio 2.n
Subcriterio 2.n	Subcriterio 2.n / Subcriterio 2.1	Subcriterio 1.n / Subcriterio 2.2	1

Fuente: Elaboración propia (2020)

Tabla 19. Ejemplo de comparación de subcriterios con respecto a criterio 3

CRITERIO 3	Subcriterio 3.1	Subcriterio 3.2	Subcriterio 3.n
Subcriterio 3.1	1	Subcriterio 3.1 / Subcriterio 3.2	Subcriterio 3.1 / Subcriterio 3.n
Subcriterio 3.2	Subcriterio 3.2 / Subcriterio 3.1	1	Subcriterio 3.1 / Subcriterio 3.n
Subcriterio 3.n	Subcriterio 3.n / Subcriterio 3.1	Subcriterio 3.n/Subcriterio 3.2	1

Fuente: Elaboración propia (2020)

Tabla 20. Ejemplo de comparación de subcriterios con respecto a alternativa 1

ALTERNATIVA 1	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3
Criterio 1	1	Criterio 1 / Criterio 2	Criterio 1 / Criterio 3
Criterio 2	Criterio 2 / Criterio 1	1	Criterio 2 / Criterio 3
Criterio 3	Criterio 3 / Criterio 1	Criterio 3 / Criterio 2	1

Fuente: Elaboración propia (2020)

Tabla 21. Ejemplo de comparación de subcriterios con respecto a alternativa 2

ALTERNATIVA 2	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3
Criterio 1	1	Criterio 1 / Criterio 2	Criterio 1 / Criterio 3
Criterio 2	Criterio 2 / Criterio 1	1	Criterio 2 / Criterio 3
Criterio 3	Criterio 3 / Criterio 1	Criterio 3 / Criterio 2	1

Fuente: Elaboración propia (2020)

Tabla 22. Ejemplo de comparación de subcriterios con respecto a alternativa 3

ALTERNATIVA 3	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3
Criterio 1	1	Criterio 1 / Criterio 2	Criterio 1 / Criterio 3
Criterio 2	Criterio 2 / Criterio 1	1	Criterio 2 / Criterio 3
Criterio 3	Criterio 3 / Criterio 1	Criterio 3 / Criterio 2	1

Fuente: Elaboración propia (2020)

Una vez elaboradas las matrices de comparación se contará con las prioridades definidas y con el uso del algebra matricial será posible determinar las prioridades entre los elementos de un nivel con respecto a un elemento del nivel inmediatamente superior, obteniendo los vectores de prioridad en consideración de cada elemento analizado, por lo tanto, citando a Osorio y Orejuela (2008, pág. 248):

“Cuando las prioridades de los elementos en cada nivel se tienen definidas, se agregan para obtener las prioridades globales frente al objetivo principal. Los resultados frente a las alternativas se convierten entonces en un importante elemento de soporte para quien debe tomar la decisión”.

La notación utilizada es la siguiente:

- Para i objetivos dados $i = 1, 2, \dots, m$; se determinan los respectivos pesos w_i .
- Para cada objetivo i , se comparan las $j = 1, 2, \dots, n$ alternativas y se determinan los pesos w_{ij} con respecto al objetivo i
- Se determina el peso final de la alternativa W_j con respecto a todos los objetivos así $W_j = w_{1j}w_1 + w_{2j}w_2 + \dots + w_{mj}w_m$

“Las alternativas se ordenan de acuerdo con el W_j en orden descendente, donde el mayor valor indica la alternativa más preferida.” (Osorio, J. y Orejuela, J, 2008, pág. 248).

De manera tal resultará posible establecer la alternativa preferida y por esta vía sustentar la toma de decisión, en este punto resulta importante indicar que el abordaje asociado a las comparaciones binarias de las alternativas con cada uno de los subcriterios será sustentado en los resultados obtenidos en el desarrollo cualitativo de esta investigación y que se consolidan en el marco de la caracterización de las alternativas y de los RSU de la ciudad de Bogotá.

3.4. Análisis de resultados

Una vez obtenido cada vector de prioridad se procederá a calcular el coeficiente de consistencia para validar que los juicios no tengan errores entre ellos, evitando la contradicción entre los mismos, tal coeficiente deberá ser menor que 0,10 para ser aceptado, en caso contrario los juicios deberán ser reevaluados, nuevamente citando a (Osorio, J. y Orejuela, J, 2008). A continuación, se presenta un algoritmo para el cálculo de éste tal coeficiente debe aplicarse para todos los criterios:

“Para cada línea de la matriz de comparación por pares determinar una suma ponderada con base a la suma del producto de cada celda por la prioridad de cada alternativa o criterio correspondiente.

Para cada línea, dividir su suma ponderada por la prioridad de su alternativa o criterio correspondiente.

- *Determinar la media λ_{max} del resultado de la etapa anterior.*
- *Calcular el índice de consistencia para cada alternativa o criterio*
 $CI = (\lambda_{max} - m) / (m-1)$
Donde $m =$ No de alternativas
- *Determinar el IA de la Tabla 23*

Tabla 23. Índices IA

Número de alternativas de decisión, m	Índice Aleatorio, IA
3	0.58
4	0.9
5	1.12
6	1.24
7	1.32
8	1.41

Fuente: Osorio, J. y Orejuela, J, (2008)

- *Determinar el índice de cociente de consistencia*

(*CCi*): $CCi = CI/IA$ " (Osorio, J. y Orejuela, J, 2008, pág. 251)

3.5. Selección de alternativa

Con el procedimiento previamente realizado resultará posible establecer la alternativa preferente de valorización energética para los RSU de la ciudad de Bogotá basado en un proceso de análisis jerárquico.

CAPITULO 4 – DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

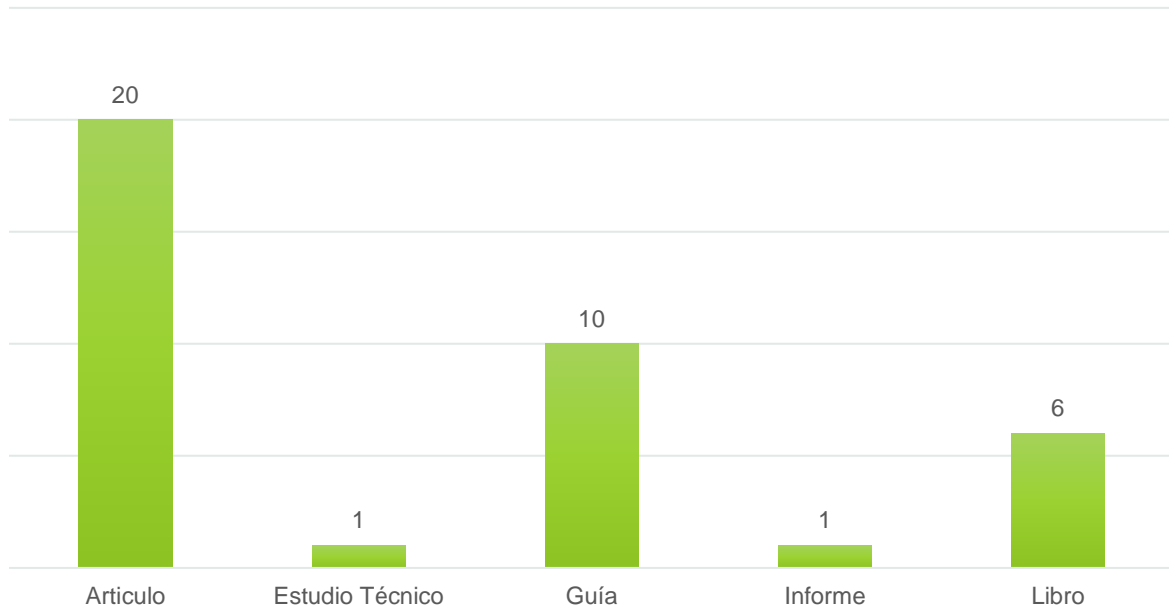
El capítulo que a continuación se presenta refiere el desarrollo de la investigación de tipo mixto, se aborda basada en una primera sección cualitativa asociada a la descripción de alternativas de valorización energética y a la caracterización de RSU de la ciudad de Bogotá, para posteriormente implementar el componente cuantitativo en el marco del desarrollo de un análisis jerárquico multicriterio alimentado tanto por los juicios de valor emitidos por un panel de expertos como por la información cualitativa en relación con la información de contexto sobre alternativas de valorización energética y RSU.

4.1. Descripción de alternativas de valorización energética de RSU

Con el objeto de describir las alternativas de valorización energética de residuos sólidos consideradas para la ciudad de Bogotá se realizó una búsqueda exhaustiva de información secundaria permitiendo entender cada una y así poder realizar la caracterización sustentada en estudios, investigaciones y experiencias de implementación de este tipo de sistemas en países desarrollados y en vía de desarrollo.

En total se revisaron 35 documentos entre los cuales, 17 son artículos de revistas especializadas; como Waste Mangement, Procedia Engineering y Journal of Environmental Research, Engineering and Management; 10 guías técnicas específicas 2 capítulos de libros, 2 informes y 4 documentos relacionados detallados en el Gráfico 3.

Gráfico 3. Relación de tipo de documentos revisados.



Fuente: Elaboración propia (2020)

La documentación revisada está comprendida entre los años 1995 y 2020, siendo el 2019 el año con más artículos revisados con 6, seguido por 2017 con 5, 2011 con 4 y finalmente 2020 con 3. Una vez realizada la lectura y análisis de cada uno de los documentos considerados se elabora la Tabla 24 que contiene una clasificación documental considerando la temática abordada (TVER: Tecnologías de valorización energética de residuos, EdI: Experiencias de implementación LyR: Lineamientos y recomendaciones), una breve síntesis y los aspectos relativos a título, autor, año y lugar de procedencia (país) del documento.

Tabla 24. Relación de referencias consultadas para la investigación

ID	Título del Documento	Autor	Año	Síntesis – Información general disponible en el documento	TVER	Edi	LYR	Tecnología
1	Bermuda Tynes Bay waste-to-energy facility	D.J. Arden	1995	A mitad de 1980, el gobierno de Bermuda, una isla pequeña en la mitad del atlántico decidió pasar del relleno sanitario a un incinerador para aprovechamiento energético de residuos. En 1987 se presentó una demora de 3 años por objeciones ambientales. La planta produce 3.8 Mw que alcanzan a suplir su necesidad energética y entregar al sistema energético de la isla un 5% de la demanda de la isla. La planta tiene dos líneas de flujo que procesan 144 t de residuos al día.		X		Incineración
2	Municipal Solid Waste Incineration	T. Rand, J. Haukohl, U. Marksen	2000	Este libro aborda todos los requerimientos para la implementación exitosa de un proyecto de incineración de RSU. En la evaluación del proyecto, define la caracterización y composición necesaria de los residuos para poder usarlos como combustible, así como los datos económicos y financiación. En la parte técnica de documento, provee información clave como la localización, tecnologías, control de emisiones, residuos generados y operación y mantenimiento.	X			Incineración
3	An overview of the global waste-to-energy industry	Nickolas J. Themelis	2003	Presenta una revisión del estado de la industria de waste-to-energy en el mundo en el año de publicación. Presenta datos relevantes en cuanto a avances en el control de emisiones, cantidad de residuos procesados y presenta algunos beneficios ambientales del WtE	X			Waste-to-Energy
4	Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad. Cap. 8 Generación de energía a partir de los RSU	Jose Carlos Escobar Palacio	2005	capítulo 8 del libro Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad, resume el enfoque de las tecnologías de tratamiento de residuos sólidos para generación de energía. Debido a la problemática situación que viven las ciudades por la creciente cantidad de RSU que generan, y, por consiguiente, la demanda incesante en materia de nuevos sitios para su disposición final sanitarios comienza a evaluarse diferentes tecnologías para el tratamiento de dichos residuos.	X			Waste-to-Energy
5	Tratamiento y valorización energética de residuos	Castells, Xavier Elias	2005	El libro presenta todo el proceso de generación de energía a partir de una masa orgánica, o residuo a través del todo el ciclo y sus variables detallando su importancia en la valorización energética de residuos.	X			Incineración, Gasificación, Pirolisis, Digestión Anaerobia

ID	Título del Documento	Autor	Año	Síntesis – Información general disponible en el documento	TVER	Edi	LyR	Tecnología
6	Energy and environmental analysis of an innovative system based on municipal solid waste (MSW) pyrolysis and combined cycle	Paolo Baggio	2008	Este artículo presenta el análisis de impacto ambiental y energético de un sistema innovador basado en la pirólisis de RSU que produce combustibles sólidos (carbón), líquidos (alquitrán) y gas (gas de síntesis) que se utilizan en un ciclo combinado para la generación de energía eléctrica.	X			Pirólisis
7	Standard for the production and use of Refuse Derived Fuel	EPA South Australia	2010	La autoridad de protección ambiental del sur de Australia presenta un estándar para la producción de combustible derivado de residuos para que sea utilizado para la producción de energía o en procesos industriales.			X	RDF
8	Manual del Biogás	FAO	2011	El biogás, como fuente de energía renovable, ha despertado un gran interés en los últimos años, siendo tal vez una de las tecnologías de más fácil implementación, sobre todo en sectores rurales. Su potencial desarrollo, no solo considerando la producción de biogás, sino que como ayuda a la obtención de biofertilizante y tratamiento de problemas sanitarios en algunos casos, hacen que replicabilidad y difusión en los sectores con abundancia de materia orgánica de desecho sea atractivo.			X	Digestión anaeróbica
9	Situación y potencial de valorización energética directa de residuos	IDEA Instituto para Diversificación y Ahorro de la Energía	2011	El objeto del trabajo es llevar a cabo un estudio de la situación actual y del potencial de valorización energética directa de residuos en España, con miras tanto a la inclusión de este sector energético en el futuro Plan de Energías Renovables 2011-2020 como a la optimización del aprovechamiento energético de estos residuos.	X			Estudio de todas las tecnologías
10	Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A revise	Umberto Arena	2011	El artículo propone una evaluación crítica de la gasificación de RSU, partiendo de los aspectos básicos del proceso y llegando a un análisis comparativo de los reactores, así como de las posibles configuraciones de la planta. El análisis indica que la gasificación es una opción técnicamente viable para la conversión de residuos sólidos, incluidos los residuos de la recogida selectiva de RSU.	X			Gasificación

ID	Título del Documento	Autor	Año	Síntesis – Información general disponible en el documento	TVER	Edi	LyR	Tecnología
11	Gasification: the waste and energy solution	Gasification Technologies Council	2011	El Consejo Global de Tecnologías Syngas en una organización que promueve las tecnologías que generan el Syngas y facilita las relaciones entre productores de tecnología, proveedores y dueños de plantas se gasificación. Presenta la demanda del sector energético y hace un resumen de la tecnología, los productos que genera y sus beneficios.	X			Gasificación
12	ISWA GUIDELINES WASTE TO ENERGY IN LOW AND MIDDLE INCOME	ISWA	2013	La Asociación Internacional de Residuos Sólidos presenta en esta guía, recursos para toma de decisiones en países de medianos y bajos ingresos en cuando a adoptar instalaciones de incineración de residuos como parte de su sistema de gestión de residuos.			X	Incineración
13	ISWA Alternative Waste Conversion Technologies	ISWA	2013	Este artículo presenta información referente a las tecnologías alternativas conversión térmica de residuos para inversionistas que pretendan invertir en este tipo de tecnologías. Contiene definiciones, aspectos técnicos, económicos; y algunos ejemplos de aplicación de estas tecnologías alrededor de mundo.	X			Gasificación, pirolisis
14	Reprint of: Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A ¿review	Dezhen Chen	2014	La pirolisis se ha examinado como una alternativa atractiva a la incineración para la eliminación de RSU (RSU) que permite la recuperación de energía y recursos; sin embargo, rara vez se ha aplicado de forma independiente con la salida de productos de pirolisis como productos finales. Esta revisión aborda el estado del arte de la pirolisis de RSU en lo que respecta a sus tecnologías y reactores, productos e impactos ambientales.	X			Pirolisis
15	Economic and environmental impact of waste-to-energy (WTE) alternatives for waste incineration, landfill, and anaerobic digestion	Sieting Tana	2014	Este documento tiene como objetivo evaluar el impacto económico y ambiental de la incineración de residuos, el sistema de recuperación de gases de relleno sanitario (LFGRS) y la digestión anaeróbica (DA) para la gestión de RSU (RSU) en Malasia y, posteriormente, evaluar el potencial de cada tecnología para usos energéticos y reducción de carbono	X			Incineración, digestión anaeróbica

ID	Título del Documento	Autor	Año	Síntesis – Información general disponible en el documento	TVER	Edi	LyR	Tecnología
16	Process aspects in combustion and gasification Waste-to-Energy (WtE) units	Bo Leckner	2014	Este artículo discute los pasos de los procesos más comunes, los dispositivos empleados mientras se observan las condiciones ambientales de algunos métodos de conversión termo química de residuos. Se enfoca en los RSU de diferentes regiones del mundo. Se analiza en detalle los diferentes dispositivos utilizados en los procesos y los materiales resultantes.	X			Incineración, Gasificación, pirolisis
17	Heat and electricity from waste Sysav's waste-to-energy plant	Sysav	2015	Este documento presenta la planta de Waste-to-Energy ubicada en la ciudad de Malmö Suiza. Esta planta está en operación desde 1973 y cuenta con 4 calderas, dos de ellas, las más antiguas, producen calor para el sistema de calefacción urbana y las 2 más nuevas producen calor y electricidad. Procesa 630.000 toneladas de residuos al año y produce 1.400.000 MWh de calor y 250.000 MWh de electricidad al año.		X		Incineración
18	Waste to Energy (WTE) Technology Applications for Municipal Solid Waste (MSW) Treatment in the Urban Environment.	Urso Campos	2015	Este documento presenta un análisis de las tres principales tecnologías termoquímicas de valorización de residuos como la incineración, gasificación y pirolisis y su comparación con disposición en relleno sanitario y su posible implementación como alternativa sostenible para el manejo de residuos en entornos urbanos.	X			Waste-to-Energy
19	Decision Maker's Guides for Solid Waste Management Technologies	World Bank Group	2016	Un documento creado para facilitar a los tomadores de decisiones el entendimiento de las tecnologías de valorización energética de residuos.	X			Waste-to-Energy
20	Municipal solid waste management and waste-to-energy in the context of a circular economy and energy recycling in Europe	J. Malinauskaite	2017	Este documento propone una revisión general de los sistemas nacionales de gestión de residuos municipales y la conversión de residuos en energía como una parte importante en el contexto de la economía circular en los países seleccionados en Europa. Analizan sistemas de manejo de residuos municipales en la región central y oriental de Europa como Polonia, Slovenia; región sur como Grecia, Italia y España; región norte como Noruega y región occidental como el Reino Unido.		X		Waste-to-Energy
21	A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste	Atul Kumar	2017	Este estudio revisa el escenario actual de opciones tecnológicas de WTE (incineración, pirolisis, gasificación, digestión anaeróbica y relleno sanitario con recuperación de gas) para la recuperación energética efectiva y los desafíos que enfrentan los países desarrollados y en	X			Incineración, Gasificación, pirolisis, digestión anaeróbica

ID	Título del Documento	Autor	Año	Síntesis – Información general disponible en el documento	TVER	Edi	LyR	Tecnología
				desarrollo. Esta revisión proporcionará un marco para evaluar las opciones tecnológicas basadas en estudios de casos de países desarrollados y en desarrollo.				
22	Opciones para el aprovechamiento energético de residuos en la gestión de RSU	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ)	2017	Presenta las diferentes tecnologías de aprovechamiento energético de residuos (WtE) actualmente aplicadas a nivel municipal, y su papel potencial en un sistema integral para la gestión de residuos. La Guía buscar orientar a los responsables de la toma de decisiones y sus asesores en la evaluación de oportunidades, límites y riesgos de las diversas tecnologías WtE para lograr una planeación efectiva y una inversión eficiente en la gestión de residuos.			X	Estudio de todas las tecnologías
23	Waste-To-Energy Technologies: an opportunity of energy recovery from Municipal Solid Waste, using Quito - Ecuador as case study	Diego Moya	2017	En este estudio, se estimó el potencial de generación de energía a partir de RSU (RSU) en Quito, Ecuador para procesos bioquímicos y termoquímicos utilizando modelos genéricos. Los resultados mostraron que los RSU de Quito contenían 69,3% de residuos biodegradables y 30,7% de residuos no biodegradables, siendo los residuos putrescibles el 81,4% de los residuos biodegradables. Este estudio ilustra que los RSU de Quito tienen un alto potencial para producir biogás y energía térmica.		X		-
24	Potentials of pyrolysis processes in the waste management sector	Dina Czajcznska	2017	El objetivo de este artículo es presentar la pirolisis al analizar sus condiciones de operación, la composición y los beneficios de los productos que genera en el sector de la gestión de residuos sólidos.	X			Pirolisis
25	VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE RESIDUOS: PROYECTO WTE COLOMBIA	Inerco	2018	Este documento presenta una propuesta de priorización del municipio escogido para llevar a cabo el proyecto a nivel de viabilidad para la generación de energía y generación de biogás a partir de biomasa residual. Este ejercicio partirá de la lista de municipios ya priorizados por el MVCT, la UPME, el DNP y/o el MADS, entre otros estudios relacionados con gestión integral de residuos.		X		Biogás
26	Handbook of Environmental Engineering	Rao Y. Surampalli	2018	Libro dedicado a diferentes aspectos de la ingeniería ambiental, entre ellos el manejo de residuos sólidos utilizando tecnologías como la incineración y la digestión anaeróbica.	X			Incineración, digestión anaeróbica

ID	Título del Documento	Autor	Año	Síntesis – Información general disponible en el documento	TVER	Edi	LyR	Tecnología
27	An Analysis of Operational Efficiencies in the Waste-to-Energy (WTE) Plants of Kaohsiung Municipality (Taiwan)	Wen-Tien Tsai	2019	La municipalidad de Kaohsiung en Taiwan cuenta con 4 plantas incineradoras de residuos, las cuales procesan 5400 toneladas métricas por día y produce 135 MW diarios.		X		Incineración
28	Municipal Solid Waste as a Source of Electric Power Generation in Colombia: A Techno-Economic Evaluation under Different Scenarios	Santiago Alzate	2019	Este trabajo evalúa la prefactibilidad tecno económica de proyectos de residuos a energía en Colombia utilizando cuatro tecnologías de conversión diferentes de incineración, gasificación, digestión anaeróbica y gas de relleno sanitario. Se seleccionaron tres casos de estudio para representar los centros urbanos típicos de Colombia, a saber, Guayatá, Andes y Pasto. Una vez identificadas las tecnologías factibles para cada caso, se calculó su potencial de recuperación de energía con base en los modelos matemáticos y la información disponible públicamente sobre la composición de los residuos producidos en estos tres municipios.			X	Incineración, gasificación, digestión anaeróbica, gas de relleno sanitario
29	Municipal solid waste management in South Africa from waste to energy recovery through waste to energy technologies in Johannesburg	Smangele Dlamini, Mulala Danny Simatele & Nzalalemba Serge Kubanza	2019	Teniendo en cuenta que el relleno sanitario de la Ciudad de Johannesburgo en Suráfrica cumple su ciclo en el 2023, la migración y su efecto en el crecimiento de la población están demandando un sistema de gestión de residuos que logre dar respuesta a esa generación de residuos. Los autores plantean el uso de tecnologías térmicas y biológicas para tratar de residuos y aprovechar el la porción orgánica de los residuos para producir calor o electricidad.			X	Estudio de aplicación diferentes tecnologías
30	Suitability of municipal solid waste in African cities for thermochemical waste to-energy conversion: The case of Harare Metropolitan City, Zimbabwe	Luke Makarichi	2019	En este artículo se analiza la composición de los residuos sólidos municipales, humedad, propiedades termoquímicas y contenido energético en la ciudad de Harare, capital de Zimbabwe en Africa, y se hace un análisis de como estos residuos y sus características pueden ser utilizados para la implementación de sistemas de waste-to-energy en la ciudad.		X		Incineración, gasificación, pirólisis
31	Waste to energy. Considerations for informed decision-making	UNEP	2019	Esta guía entrega información valiosa a tomadores de decisiones en países en desarrollo que estén pensando en implementar tecnologías de valorización termoquímica de residuos para la generación de energía como una opción en su sistema de manejo de residuos			X	Estudio de todas las tecnologías

ID	Título del Documento	Autor	Año	Síntesis – Información general disponible en el documento	TVER	Edi	LyR	Tecnología
32	Current Developments in Biotechnology and Bioengineering	Ashok Pandey	2019	Este capítulo estatus Global de tecnologías de Waste-to-Energy, presenta información importante sobre tecnologías como incineración, gasificación y pirolisis. Así como consideraciones en lo ambiental, económico y social y algunos beneficios de estas tecnologías y sus posibles impactos.	X			Incineración, gasificación, pirolisis
33	Biological treatment of waste – anaerobic digestion at biogas facilities	Carlo Trozzi	2019	Cubre las emisiones del tratamiento biológico de residuos por digestión anaeróbica en las instalaciones de biogás.	X			Digestión anaeróbica
34	Municipal Solid Waste Energy Conversion in Developing Countries	Suani Teixeira Coelho	2020	Este libro presenta la posibilidad de utilizar tecnologías (biológicas y termoquímicas) de valorización energética de residuos, la en países en desarrollo en continentes como Suramérica, Asia y África.	X			Digestión anaeróbica, incineración, gasificación
35	Multi-Criteria Analysis of Waste-to-Energy Technologies in Developed and Developing Countries	Naser Almanaseer	2020	El principal objetivo de este documento es utilizar un análisis multicriterio (MCA) para evaluar tecnologías de conversión de residuos en energía (WTE) e identificar las limitaciones al examinar la ubicación de una instalación WTE. A partir de esto, el enfoque se resume mejor al determinar la tecnología WTE óptima en los países desarrollados y cómo cambiaría el proceso si se implementara en los países en desarrollo. En este estudio se revisaron y evaluaron tecnologías de incineración, gasificación y pirólisis.			X	Incineración, gasificación, pirolisis.
36	CCET guideline series on intermediate municipal solid waste treatment technologies: Waste-to-Energy Incineration	UNEP	2020	Esta guía se enfoca en la tecnología de incineración WtE para RSU, principalmente desechos domésticos y comerciales, en áreas urbanas de países en desarrollo asiáticos. La guía tiene como objetivo ayudar a los tomadores de decisiones y políticos a nivel nacional y de la ciudad, residentes y otras partes interesadas que están en Búsqueda de conocimientos e información adicionales que les ayuden a formarse una imagen clara de lo que implica la incineración WtE, al considerar el potencial de introducir la tecnología de incineración WtE como una opción adecuada para mejorar la gestión de residuos.			X	Incineración

ID	Título del Documento	Autor	Año	Síntesis – Información general disponible en el documento	TVER	Edi	LyR	Tecnología
37	Multi-criteria decision analysis of waste-to-energy technologies	Wajeeha A. Qazi	2020	Este capítulo hace una revisión de cada una de las tecnologías de valorización energética de residuos abordando varios aspectos para tener en cuenta para realizar un análisis multicriterio. Dentro de los aspectos revisados en este documento está el tipo de materia prima, beneficios e inconvenientes de cada una.	X			Incineración, Gasificación, Pirolisis, Digestión Anaerobia

Fuente: Elaboración propia, 2020

Con base en que, “el objetivo de la muestra cualitativa es seleccionar casos que contribuyan al entendimiento a profundidad de un fenómeno y aprender de este” (Hernández, R., Mendoza, C, 2018, pág. 434), y partiendo de la clasificación previa se procede a desarrollar la descripción de las alternativas de valorización energética de residuos en consideración de los aspectos previamente referidos en la Tabla 24 y relacionados con descripción tecnológica, proceso, tipo de residuos que transforma, costos de operación y mantenimiento, emisiones atmosféricas, capacidad de reducir RSU a disponer, tipo de energía que produce, necesidades de preprocesamiento de RSU y eficiencia de la alternativa.

A continuación, en la Tabla 25, se presentan los aspectos de descripción tecnológica, proceso, tipo de residuos que transforma, costos de operación y mantenimiento, emisiones atmosféricas, capacidad de reducir RSU a disponer, tipo de energía que produce, necesidades de preprocesamiento de RSU y eficiencia de la alternativa, que describen la alternativa de incineración

Tabla 25. Aspectos descriptivos asociados a la alternativa de incineración

INCINERACIÓN		
Característica	Explicación breve	Fuente
Descripción tecnológica	Por medio de un proceso de combustión completa y controlada reduce el peso y el volumen de los RSU, además conlleva a una potencial recuperación de energía.	(Rao, y otros, 2018)
Proceso	Conversión por oxidación completa	(Awasthi, y otros, 2019)
Tipo de residuos que transforma	Residuos altamente combustibles, papel, madera, cartones, incluidos hasta un 10% de papeles tratados, desechos de plástico o caucho; fuentes comerciales e industriales	(Brunner, 2002)
Costos de capital	22-55 EUR/t.	(Mutz, Hengevoss, Hugi, & Gross, 2017)
Costo de operación y mantenimiento	20-35 EUR/t.	(Mutz, Hengevoss, Hugi, & Gross, 2017)
Emisiones atmosféricas	Polvo, gases ácidos, CO, productos de combustión incompleta, cenizas, hidrocarburos aromáticos policíclicos dioxinas y metales pesados.	(Rao, y otros, 2018)
Capacidad de reducir el volumen de RSU a disponer	80% - 95%.	(Mutz, Hengevoss, Hugi, & Gross, 2017)
Tipo de energía que produce	Calor.	(Mutz, Hengevoss, Hugi, & Gross, 2017)
Necesidades de preprocesamiento de RSU	No es necesaria. Pero se debe hacer una separación para extraer los residuos potencialmente reciclables.	(Awasthi, y otros, 2019), (Wajeena, Mohammed, Mohammed-HashamAzam, & Mohammed, 2018)
Eficiencia de la alternativa	50 – 60 %	(Qazi & Abushammala, 2020)

Fuente: Elaboración propia (2020)

En la Tabla 26, se presentan los aspectos de; descripción tecnológica, proceso, tipo de residuos que transforma, costos de operación y mantenimiento, emisiones atmosféricas, capacidad de reducir RSU a disponer, tipo de energía que produce, necesidades de preprocesamiento de RSU y eficiencia de la alternativa, que describen la alternativa de gasificación.

Tabla 26. Aspectos descriptivos asociados a la alternativa de gasificación

GASIFICACIÓN		
Característica	Explicación breve	Fuente
Descripción tecnológica	Proceso realizado únicamente con el 25% al 30% de oxígeno necesario para una combustión completa.	(Castells X. E., 2005)
Proceso	Conversión por oxidación parcial	(Awasthi, y otros, 2019)
Tipo de residuos que transforma	RSU, residuos orgánicos, carbón, RDF (Residue Derived Fuel), lodos, residuos de refinerías, biomasa, PVC, leña negra, neumáticos y ASR (Automotive Shredder Residue).	(Qazi & Abushammala, 2020)
Costos de capital	35 – 45 EUR/t	(Mutz, Hengevoss, Hugi, & Gross, 2017)
Costo de operación y mantenimiento	30 – 40 EUR/t	(Mutz, Hengevoss, Hugi, & Gross, 2017)
Emisiones atmosféricas	Material particulado, alquitranes, nitrógeno y azufre óxidos, dioxinas y furanos, hidrocarburos y monóxido de carbono, controlados y por medio de tecnologías de lavado de gases antes de ser liberados.	(Arena, 2012, pág. 638)
Capacidad de reducir el volumen de RSU a disponer	90%	(Qazi & Abushammala, 2020)
Tipo de energía que produce	Produce el Syngas que puede ser usado como fuente de energía	(Qazi & Abushammala, 2020)
Necesidades de preprocesamiento de RSU	Se deben remover todos los materiales inorgánicos como metales, vidrios, peligrosos y sustancias inertes. Además, se deben triturar para mantener un tamaño de partícula uniforme. Adicional se debe secar o retirar los residuos de comida para mantener una humedad por debajo del 15% para esto.	(Qazi & Abushammala, 2020)
Eficiencia de la alternativa	70 – 80%	(Qazi & Abushammala, 2020)

Fuente: Elaboración propia (2020)

En la Tabla 27, se presentan los aspectos de; descripción tecnológica, proceso, tipo de residuos que transforma, costos de operación y mantenimiento, emisiones atmosféricas, capacidad de reducir RSU a disponer, tipo de energía que produce, necesidades de preprocesamiento de RSU y eficiencia de la alternativa, que describen la alternativa de pirolisis.

Tabla 27. Aspectos descriptivos asociados a la alternativa de pirolisis

PIRÓLISIS		
Característica	Explicación breve	Fuente
Descripción tecnológica	En este proceso se descomponen todos los compuestos basados en carbono que contienen los residuos dando como resultado gases, hidrocarburos condensables y un residuo carbonoso sólido llamado char. No hay aire ni oxígeno y no se produce una combustión directa.	(Castells X. E., 2005)
Proceso	Degradación térmica de materiales orgánicos en ausencia de oxígeno.	(Awasthi, y otros, 2019)
Tipo de residuos que transforma	RSU, RDF, aguas residuales, lodos, carbón, neumáticos, ASR, biomasa, cloruro de polivinilo.	(Qazi & Abushammala, 2020)
Costos de capital	35 – 45 EUR/t	(Mutz, Hengevoss, Hugi, & Gross, 2017)
Costo de operación y mantenimiento	30 – 40 EUR/t	(Mutz, Hengevoss, Hugi, & Gross, 2017)
Emisiones atmosféricas	Se general los gases habituales de un proceso de combustión al utilizar el gas como medio de producción de energía SO ₂ , NO _x , CO y material particulado.	(Baggio, Baratieri, Gasparella, & Longo, 2008)
Capacidad de reducir el volumen de RSU a disponer	70% - 90%	(Qazi & Abushammala, 2020)
Tipo de energía que produce	Syngas (se produce a altas temperaturas), bioaceite o aceite de pirolisis (se produce a bajas temperaturas)	(Baggio, Baratieri, Gasparella, & Longo, 2008)
Necesidades de preprocesamiento de RSU	Los RSU deben ser clasificados, triturados y secados. La clasificación elimina los materiales inorgánicos como vidrio, metal, inertes y contaminantes el resto de los desechos se tritura en partículas pequeñas y uniformes de hasta 50 mm de diámetro para garantizar la consistencia de los desechos. Por último, se reduce el contenido de humedad al 20%, la materia prima se envía a una secadora o los desechos de alimentos se eliminan de la materia prima.	(Qazi & Abushammala, 2020)
Eficiencia de la alternativa	70%	(Qazi & Abushammala, 2020)

Fuente: Elaboración propia (2020)

En la Tabla 28, se presentan los aspectos de; descripción tecnológica, proceso, tipo de residuos que transforma, costos de operación y mantenimiento, emisiones atmosféricas, capacidad de reducir RSU a disponer, tipo de energía que produce, necesidades de preprocesamiento de RSU y eficiencia de la alternativa, que describen la alternativa de digestión anaeróbica

Tabla 28. Aspectos descriptivos asociados a la alternativa de digestión anaeróbica

DIGESTIÓN ANAERÓBICA		
Característica	Explicación breve	Fuente
Descripción tecnológica	Proceso bioquímico que consiste en la descomposición, por medio de microorganismos y en ausencia de oxígeno (anaerobia), de la materia orgánica para producir un gas combustible, conocido como biogás	(Mutz, Hengevoss, Hugi, & Gross, 2017)
Proceso	Conversión microbiana en ausencia de oxígeno	(Awasthi, y otros, 2019)
Tipo de residuos que transforma	Fracción orgánica de RSU, lodos de aguas residuales, desechos de jardín no leñosos y desechos forestales, residuos agrícolas, abonos y lodos animales, biomasa de algas y desechos de mataderos y aves de corral.	(Qazi & Abushammala, 2020)
Costos de capital	12 – 19 EUR/t	(Mutz, Hengevoss, Hugi, & Gross, 2017)
Costo de operación y mantenimiento	10 – 15 EUR/t	(Mutz, Hengevoss, Hugi, & Gross, 2017)
Emisiones atmosféricas	El proceso como tal se realiza en recipientes cerrados y es poco probable que se produzcan emisiones fugitivas. En el almacenamiento en tanques abiertos de los residuos orgánicos y el digestato generado en el proceso puede causar emisiones de nitrógeno (N), gases de amoníaco (CH ₃) y óxido nítrico (NO). También se pueden producir N ₂ O y CH ₄ , olores y material particulado	(Trozzi, 2019)
Capacidad de reducir el volumen de RSU a disponer	50%	(Qazi & Abushammala, 2020)
Tipo de energía que produce	Produce biogás que es utilizado como combustible para producir energía.	(Trozzi, 2019)
Necesidades de preprocesamiento de RSU	Debe pasar por procesos de clasificación, trituración y dilución. La clasificación elimina todos los materiales inorgánicos como plásticos, metales, rocas, inertes y vidrio, mientras que la trituración hace que los desechos clasificados sean consistentes con un tamaño de partícula uniforme	(Qazi & Abushammala, 2020)
Eficiencia de la alternativa	50 – 70%	(Qazi & Abushammala, 2020)

Fuente: Elaboración propia (2020)

Con lo anterior resulta posible obtener una caracterización cualitativa que consolida aspectos generales de las alternativas de incineración, gasificación, pirólisis y digestión anaeróbica que posteriormente se configurará en un insumo fundamental para la selección de la alternativa teórica de valorización energética de RSU para la ciudad de Bogotá.

4.2. Residuos Sólidos Urbanos de la ciudad de Bogotá

Para abordar la caracterización de los RSU en la ciudad de Bogotá inicialmente se refieren algunos datos sobre la generación de residuos en los domicilios, y en las áreas comerciales e industriales de la ciudad, producto de las actividades que allí se desarrollan (Moratorio et al., 2012).

Retomando información disponible sobre la generación de residuos destinados a disposición final en Bogotá para los años 2005 – 2015 en el Plan Maestro de para el Manejo Integral de Residuos Sólidos que se debió introducir al PGIRS adoptado mediante Resolución UAESP No. 132 de 2004 (UAESP, 2004, pág. 97), y los datos del Observatorio de Ambiente de Bogotá para los años 2017 y 2019 sobre la generación de residuos, y la disponible en el DANE sobre población, se realizó la estimación de la cantidad de generación de RSU en la ciudad hasta el año 2030 utilizando una regresión lineal simple. Tal estimación se sustentó teniendo en cuenta que incrementos poblacionales conllevan a incrementos en el consumo y por esta vía a la generación de una mayor cantidad de residuos, tal como lo afirman (Colorado, y H.; Echeverry, I, 2020, pág. 52) por lo tanto, se consideró la relación directa existente entre la generación de residuos y la cantidad de población, tal procedimiento se abordó teniendo en cuenta la revisión realizada por el DANE recientemente acerca de las proyecciones poblacionales gracias a la ejecución del Censo Nacional de Población 2018,

“La revisión de las proyecciones de población constituye un ejercicio necesario a la luz de la evolución de los componentes básicos del crecimiento demográfico. Toda proyección se modela basada en escenarios prospectivos del cambio de la fecundidad, mortalidad y migración; dichos supuestos son susceptibles a los cambios sociales y económicos que surjan en el periodo proyectado.” (DANE, 2020)

Como resultado fue posible estimar la generación de residuos hasta el año 2030, a partir de la Ecuación 1, que presentó un coeficiente de ajuste R^2 de 0,91, en el X: Población Total

Gráfico 4 se presenta el gráfico de dispersión (por medio del cual se obtiene la ecuación lineal).

Ecuación 1

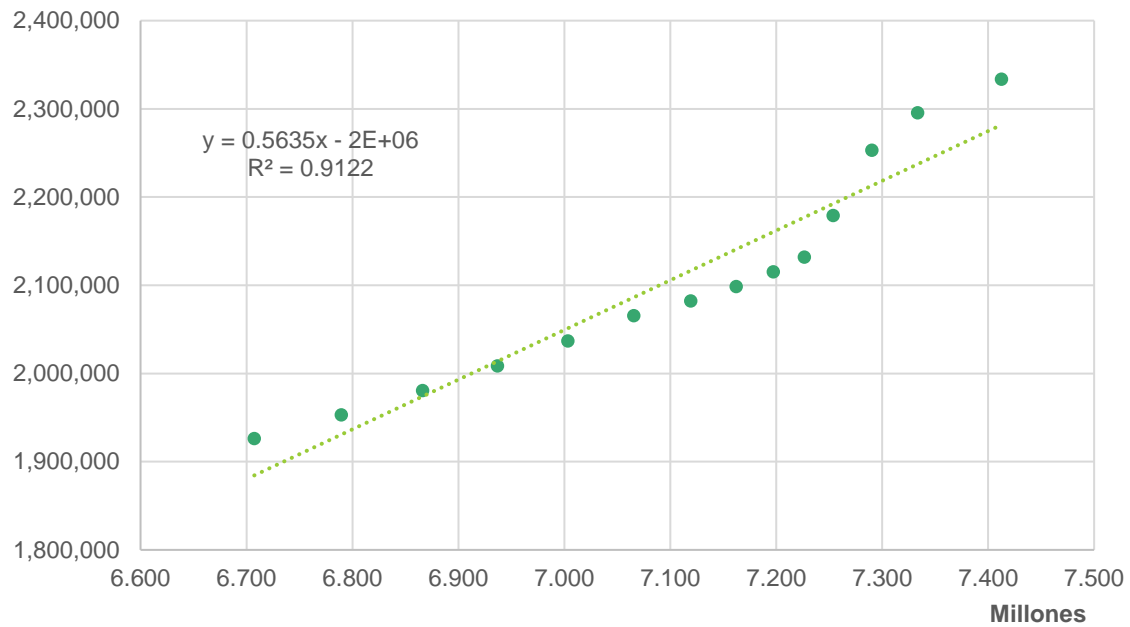
$$Y = 0,5635x - 2E + 06$$

Donde;

Y: Total Residuos (t/año)

X: Población Total

Gráfico 4. Gráfico de dispersión Residuos Totales Vs Población Total



Fuente: Elaboración propia con base en información de UAESP (2004, pág. 97) Observatorio de Ambiente de Bogotá y datos poblacionales DANE (2020)

A continuación, en la Tabla 29, se presentan los resultados obtenidos en relación con la proyección de generación de residuos per-cápita para Bogotá encontrando que la variación porcentual promedio anual entre 2005 y 2030 de generación de residuos es de 1,3% y que el promedio de generación per cápita corresponde a 305 Kg/año.

Tabla 29. Población total, residuos generados y generación de residuos per cápita para la ciudad de Bogotá. 2005-2020

Año	Población Total*	Total, Residuos (t/año) **	Variación porcentual anual de la generación de residuos	Generación de Residuos Per Cápita (t/año)	Generación de Residuos Per Cápita (kg/año)
2005	6.707.338	1.926.086	0	0,287	287
2006	6.789.687	1.953.219	1,4%	0,288	288
2007	6.866.363	1.980.734	1,4%	0,288	288
2008	6.936.977	2.008.637	1,4%	0,290	290
2009	7.003.434	2.036.933	1,4%	0,291	291
2010	7.065.669	2.065.627	1,4%	0,292	292
2011	7.119.281	2.082.043	0,8%	0,292	292
2012	7.162.261	2.098.589	0,8%	0,293	293
2013	7.197.326	2.115.267	0,8%	0,294	294
2014	7.226.652	2.132.077	0,8%	0,295	295
2015	7.253.823	2.178.886	2,2%	0,300	300
2016	7.290.415	2.253.072	3,4%	0,309	309
2017	7.333.415	2.295.460	1,9%	0,313	313
2018	7.412.566	2.333.568	1,7%	0,315	315
2019	7.592.871	2.278.583	-2,4%	0,300	300
2020	7.743.955	2.363.719	3,7%	0,305	305
2021	7.834.167	2.414.553	2,2%	0,308	308
2022	7.901.653	2.452.581	1,6%	0,310	310
2023	7.968.095	2.490.022	1,5%	0,312	312
2024	8.034.649	2.527.525	1,5%	0,315	315
2025	8.101.412	2.565.146	1,5%	0,317	317
2026	8.168.421	2.602.905	1,5%	0,319	319
2027	8.235.512	2.640.711	1,5%	0,321	321
2028	8.302.442	2.678.426	1,4%	0,323	323
2029	8.368.915	2.715.884	1,4%	0,325	325
2030	8.434.700	2.752.953	1,4%	0,326	326

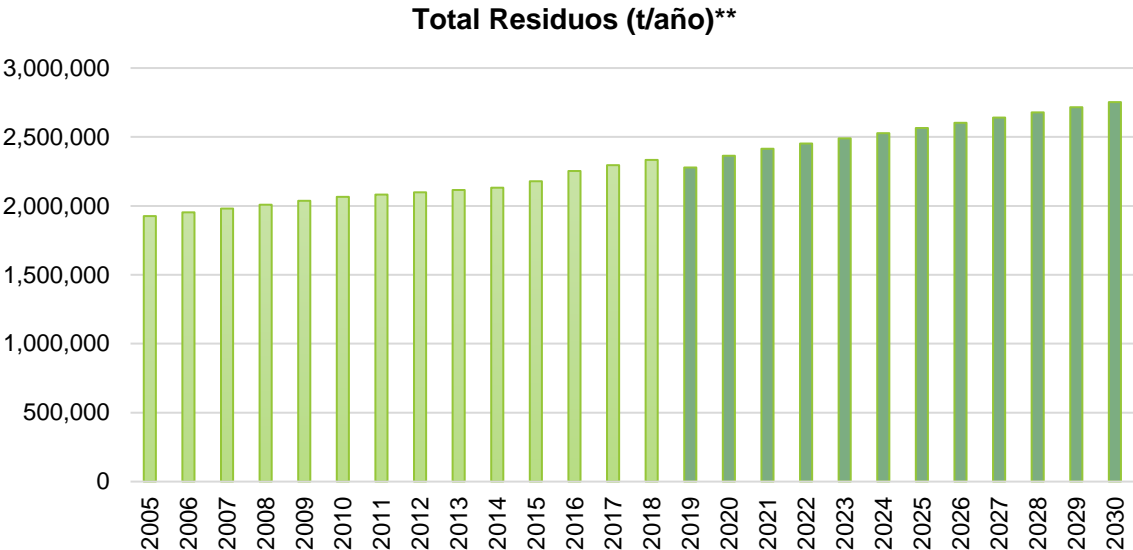
*Estimaciones de población municipal por área 2005 – 2017 con base en el CNPV 2018. Proyecciones anuales de población por sexo y edad para el periodo 2018-2020 Serie de proyecciones de población total municipal por área para el periodo 2024–2035 <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion>

**Los datos correspondientes al total de residuos se retoman de proyección de residuos para disposición final del Plan Maestro para el Manejo Integral de Residuos Sólidos que se debió introducir al PGIRS adoptado mediante Resolución UESP No. 132 de 2004 disponibles en la página 97 Observatorio Ambiente de Bogotá <https://oab.ambientebogota.gov.co/indicadores/?id=37&v=l>. 2017 - 2019

Fuente: Elaboración Propia (2020)

Ahora bien el Gráfico 5, se elabora retomando los datos consignados en la Tabla 29, allí por medio de las barras de verde claro se refieren los datos existentes y con las barras de color verde oscuro se representan los datos estimados.

Gráfico 5. Residuos generados entre 2005 – 2018, generación de residuos estimada entre 2019 -2020, para la ciudad de Bogotá



Fuente: Elaboración propia con base en información de UAESP (2004, pág. 97) Observatorio de Ambiente de Bogotá y datos poblacionales DANE (2020)

Con base en la actualización de información previamente presentada se procede con la caracterización de los residuos, iniciando por su clasificación de acuerdo a las categorías de materia orgánica, plástico, cartón, papel, textiles, vidrio, metales, cerámica, cuero y hueso, el abordaje de tal caracterización fue posible al recopilar información en su mayoría proveniente de la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos (UAESP) y de los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos para la ciudad de Bogotá que refieren la caracterización de los residuos recibidos en el Relleno Sanitario Doña Juana, la Tabla 30 se construye con base en información secundaria que da cuenta de la caracterización de RSU de acuerdo a las categorías de materia orgánica, plástico, cartón, papel, textiles, vidrio, metales, cerámica, cuero y hueso para los años 2011, 2012, 2015, 2016, 2017 y 2018.

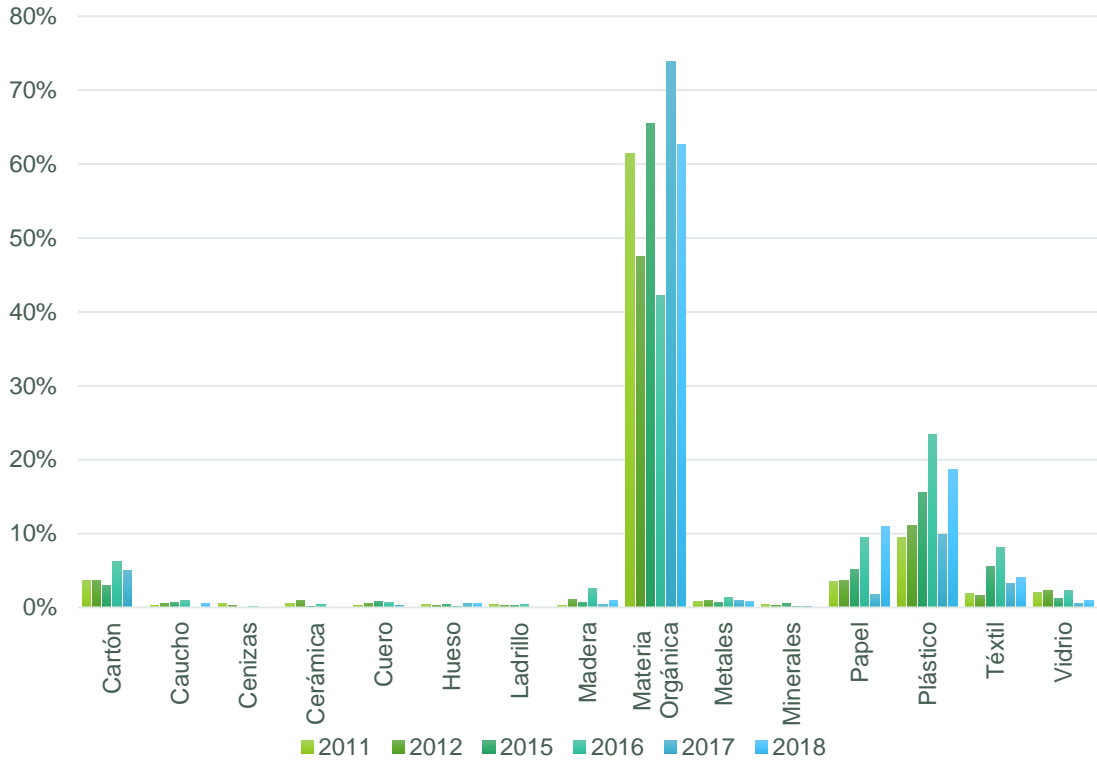
Tabla 30. Caracterización de los RSU generados en Bogotá, actualizada de acuerdo con las proyecciones de generación (2011-2018)

Años	2011	2012	2015	2016	2017	2018
Total, Residuos (t/año)	2.290.285	2.290.144	2.269.533	2.253.072	2.295.460	2.333.568
Cartón	82.450	85.117	66.270	141.042	115.921	8.868
Caucho	4.810	11.556	14.525	20.052	0	11.668
Cenizas	13.742	6.206	0	3.830	0	8.868
Cerámica	13.742	22.424	2.043	7.660	459	8.868
Cuero	4.810	11.527	19.518	15.772	5.968	8.868
Hueso	10.077	6.206	9.305	1.802	11.018	11.668
Ladrillo	10.077	6.206	7.036	9.238	689	8.868
Madera	7.329	24.847	16.114	58.129	8.952	44.338
Materia Orgánica	1.406.922	1.087.150	1.486.090	951.698	1.695.656	1.463.147
Metales	19.467	21.424	15.433	31.318	22.955	18.669
Minerales	10.077	6.206	10.667	2.478	1.607	8.868
Papel	80.160	85.117	117.789	212.014	38.793	254.359
Plástico	216.203	252.763	352.912	526.994	226.562	436.377
Textil	43.286	36.346	125.278	183.175	74.602	93.343
Vidrio	47.638	52.697	26.554	52.271	12.395	23.336
Residuos sin clasificación	319.495	574.325	0	35.599	79.882	0

Fuentes: Elaboración propia basada en UAESP (2012a), UAESP (2015), INERCO (2018), Veeduría Distrital (2018) y UAESP (2018)

A partir de la información previamente consignada en la Tabla 30, se construye el Gráfico 6 en donde es posible observar el comportamiento de la cantidad de generación de residuos en la ciudad de Bogotá de acuerdo a su clasificación por tipo de residuos entre el año 2011 y 2018.

Gráfico 6. Cantidad RSU generados en Bogotá por tipo de residuos, entre los años 2011 y 2018



Fuente: Elaboración propia basada en UAESP (2012a), UAESP (2015), INERCO (2018), Veeduría Distrital (2018) y UAESP (2018)

En el Gráfico 6, resulta evidente que la generación de residuos orgánicos es predominante en la ciudad, seguido por los plásticos, papel, y cartón, respecto a los primeros se observa un comportamiento de reducción durante los años 2011(representando el 61,43% del total de residuos generados), 2012 (representando el 47,47% del total de residuos generados) y 2016 (representando el 42,24% del total de residuos generados) probablemente asociado al mejoramiento del IPC, sin embargo, para los años 2017 (representando el 73,87% del total de residuos generados) y 2018 (representando el 62,7% del total de residuos generados) se revierte presentando incrementos y logrando incluso acercarse a la cantidad generada durante 2011. Los residuos clasificados como plástico presentan un comportamiento inverso al encontrado en la materia orgánica, de manera que la tendencia en los primeros años es incremental 2011 (representando el 9,44% del total de residuos generados), 2012 (representando el 11,04% del total de residuos generados), 2015 (representando el 15,55% del total de residuos generados), mientras que en 2017 (representando el 9.87% del total de residuos

generados) se reduce llegando incluso a cifras cercanas a las presentadas en 2011, los residuos definidos como papel mantienen un comportamiento incremental en los años considerados, mientras que los de cartón tienen una tendencia de generación que disminuye con el tiempo.

“La composición de los residuos dispuestos en los rellenos sanitarios muestra la predominancia de los residuos orgánicos sobre la masa total de residuos por cuanto presentan tasa más altas de humedad, acidez, los nutrientes y contenido de bacterias. En estas condiciones los sistemas de disposición final bien diseñados y operados, mediante controles a la dispersión de gases y lixiviados, redes de captura, recolección y aprovechamiento de gases, tienen un importante potencial para lograr beneficios por reducciones de gases efecto invernadero.” (UAESP, 2004, pág. 58)

Ahora bien, con el objeto de aproximarse a la clasificación de los residuos entre los años 2019 y 2030 se calcula el promedio por categoría de residuos generados entre 2011 y 2018, con base en la información secundaria recabada disponible en los documentos consultados provenientes de la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos, que además han sido el insumo para la planeación del manejo en la ciudad, y el porcentaje de residuos sin clasificación que corresponde al 5,45% del promedio calculado, se distribuye de manera equitativa entre las 15 categorías, el resultado de este ejercicio se presenta en la Tabla 31, que contiene una estimación de la composición de los residuos sólidos urbanos vinculando la información previamente recabada en relación con la categorización de los mismos.

Tabla 31. Estimación de Toneladas de RSU anuales por categoría. 2019 – 2030

Años	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Total, Residuos (t/año)	2.281.620	2.366.816	2.417.687	2.455.742	2.493.209	2.530.739	2.568.386	2.606.173	2.644.005	2.681.747	2.719.231	2.756.327
Cartón	72.706	75.420	77.041	78.254	79.448	80.644	81.844	83.048	84.253	85.456	86.650	87.832
Caucho	20.137	20.889	21.338	21.674	22.004	22.336	22.668	23.001	23.335	23.668	23.999	24.326
Cenizas	19.043	19.754	20.178	20.496	20.809	21.122	21.436	21.752	22.067	22.382	22.695	23.005
Cerámica	17.041	17.678	18.057	18.342	18.622	18.902	19.183	19.465	19.748	20.030	20.310	20.587
Cuero	18.165	18.844	19.249	19.552	19.850	20.149	20.449	20.749	21.051	21.351	21.649	21.945
Hueso	17.474	18.127	18.516	18.808	19.095	19.382	19.670	19.960	20.250	20.539	20.826	21.110
Ladrillo	15.421	15.997	16.340	16.598	16.851	17.104	17.359	17.614	17.870	18.125	18.378	18.629
Madera	28.865	29.943	30.587	31.068	31.542	32.017	32.493	32.971	33.450	33.927	34.401	34.871
Materia Orgánica	1.384.364	1.436.056	1.466.922	1.490.012	1.512.744	1.535.515	1.558.358	1.581.285	1.604.239	1.627.139	1.649.882	1.672.390
Metales	29.551	30.654	31.313	31.806	32.291	32.778	33.265	33.755	34.245	34.733	35.219	35.699
Minerales	15.136	15.701	16.038	16.291	16.539	16.788	17.038	17.289	17.540	17.790	18.039	18.285
Papel	144.063	149.443	152.655	155.057	157.423	159.793	162.170	164.556	166.944	169.328	171.694	174.037
Plástico	352.490	365.652	373.511	379.391	385.179	390.977	396.793	402.631	408.476	414.306	420.097	425.828
Textil	97.776	101.427	103.607	105.238	106.843	108.452	110.065	111.684	113.306	114.923	116.529	118.119
Vidrio	49.388	51.233	52.334	53.158	53.969	54.781	55.596	56.414	57.233	58.050	58.861	59.664

Fuente: Elaboración propia basada en UAESP (2012a), UAESP (2015), INERCO (2018), Veeduría Distrital (2018) y UAESP (2018)

Por medio de la clasificación previa, es posible evidenciar la composición de los residuos sólidos generados en la ciudad, por lo tanto, se procede con la caracterización fisicoquímica, teniendo en cuenta que Castells (2005), indica desde el punto de vista energético se deben tener en cuenta los siguientes grupos de residuos

En el proceso de desarrollo de esta sección del documento, el mundo se enfrenta a la pandemia COVID-19, escenario que modifica las actividades y dinámicas que estuvieron vigentes en la humanidad hasta el primer trimestre del año 2020 y termina por modificar la forma de vida, y claro está la ciudad de Bogotá no fue la excepción. Este nuevo contexto tal como lo advierte la Corporación Financiera Internacional (IFC por sus siglas en inglés) genera impactos sobre la gestión de los residuos, entre ellos; el incremento en el riesgo de enfermedad en los lugares en donde la gestión es inadecuada, afectaciones sobre la población que trabaja informalmente en la cadena de manejo de residuos (recicladores de oficio) a causa de las cuarentenas obligatorias, riesgos laborales por condiciones de trabajo inseguras, redistribución en la generación de residuos, cambios en la forma de gestionar los residuos, entre otros (Sinha, 2020).

Para efectos de la consolidación de información acá presentada es importante considerar que algunos de los impactos indicados tendrán repercusiones directas sobre la composición de los residuos sólidos urbanos de la ciudad de Bogotá, (Sinha, 2020) refiere que los residuos médicos se incrementarían en 40%, la generación de residuos provenientes del sector industrial y comercial se reducirá significativamente por la disminución de la actividad manufacturera, la producción de residuos peligrosos proveniente de los sectores médico y farmacéutico tendrá un incremento significativo, y la producción de residuos sólidos urbanos se aumentará, así como también se espera una reducción en las actividades de reciclaje. Por su parte, (Van, Y., Jiang, P., Hemzal, M., y Jaromír, J., 2020), indican que; la separación manual y el reciclaje se reducen debido al potencial riesgo de infección, en Shanghái la generación de RSU se redujo en 23%, en Singapur aumento en 3% y en la ciudad de Brno en la República Checa la producción de RSU aumento en 1% y los residuos provenientes del sector industrial disminuyeron en 40%, adicionalmente concluyen que los impactos de la pandemia sobre los residuos dependerán de los factores geográficos y sociológicos de cada lugar. En relación con los efectos de la pandemia sobre los RSU (Nulkarni, B., y Anantharama, V, 2020) observan que de acuerdo con la Asociación de Residuos Sólidos de Norte América (SWANA por sus siglas en inglés) en Estados Unidos tanto la generación de residuos sólidos como de

residuos reciclables aumento, durante el mes de abril presentó un incremento de 20% y atribuye el incremento de residuos reciclables a que en muchas partes los gobiernos suspendieron los programas de reciclaje para asegurarse de hacer una adecuada disposición de todos los residuos.

Considerando la información previamente plateada resulta definitivo considerar los efectos de la pandemia en la composición de los RSU en la ciudad, razón por la cual la información acá presentada en términos de características y seguramente cantidades variará a partir del año 2020, sin embargo y retomando lo referido por (Van, Y., Jiang, P., Hemzal, M., y Jaromír, J., 2020), esto depende de las condiciones sociales, geográficas, económicas y culturales de cada país, y a la fecha se desconoce el balance sobre tales efectos para la ciudad de Bogotá o similares en la región.

La caracterización fisicoquímica se realiza teniendo en cuenta información de carácter secundario que presenta información específica para la ciudad de Bogotá en 2011 sobre los componentes físico-químicos de los residuos urbanos presentada por la UAESP (2012a), allí se aborda un análisis que da cuenta de la composición fisicoquímica de los residuos degradables producidos en la ciudad de Bogotá para el año 2011, que incluye los residuos clasificados bajo las categorías de materia orgánica, textil, papel y cartón refiriendo que su composición es la que se presenta en la Tabla 32.

Tabla 32. Composición fisicoquímica de los RSU degradables

Humedad	61,70%
Carbono	16,00%
Hidrógeno	2,41%
Nitrógeno	0,60%
Azufre	0,12%
Oxígeno	15,40%
Cenizas	3,67%

Fuente: UAESP (2012a)

En relación con el poder calorífico superior e inferior se refieren los datos indicados en la Tabla 33

Tabla 33. Poder Calorífico superior e inferior de los RSU degradables para Bogotá

Poder Calorífico Superior PCS(Kcal/Kg)	894,17
Poder Calorífico Inferior (Kcal/Kg)	745,63

Fuente: UAESP (2012a)

Ahora bien, para establecer el potencial de generación energética de los RSU generados en Bogotá, es utilizada la *Ecuación 2*, retomada de (Moratorio, D., Rocco, I y Castelli, M, 2012, pág. 119) esta permite con base en; las proyecciones de generación de residuos previamente realizadas, su clasificación y el establecimiento de las propiedades fisicoquímicas plantear el contenido de energía de los RSU para la ciudad de Bogotá.

Ecuación 2

$$CE_{RSU} = VRSUB_{ta} \left(\frac{Kg}{día} \right) * \frac{PCI}{Kg} * \frac{1día}{86400 seg}; \text{ Dónde:}$$

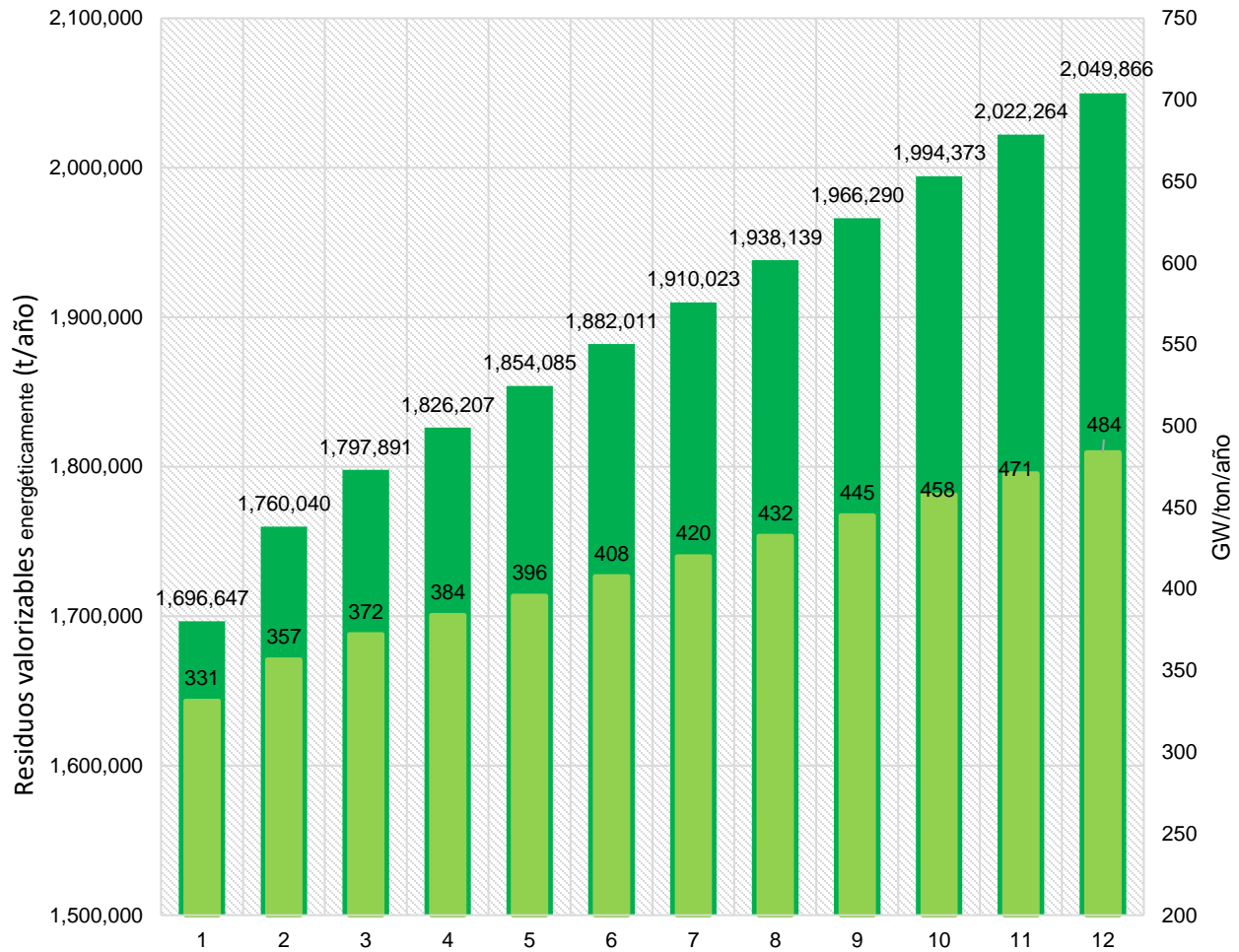
CE_{RSU} : Contenido de energía de RSU

$VRSU_{Bta}$: Volumen de RSU generados en la ciudad de Bogotá diariamente

PCI : Poder Calorífico Inferior

Al respecto se encuentra que entre los años 2019 y 2030 el contenido promedio de los RSU valorizables energéticamente es de 1.891.486 toneladas anuales y que su contenido de energía sería en promedio de 413 GW/Ton/año, en el Gráfico 7 es posible evidenciar tanto la evolución de la generación de residuos valorizables energéticamente considerando lo establecido por (Castells X. E., 2005), cómo también el contenido energético de este grupo de residuos cada año.

Gráfico 7. Cantidad de RSU valorizables energéticamente y su contenido energético (2019-2030)



Fuente: Elaboración propia (2020)

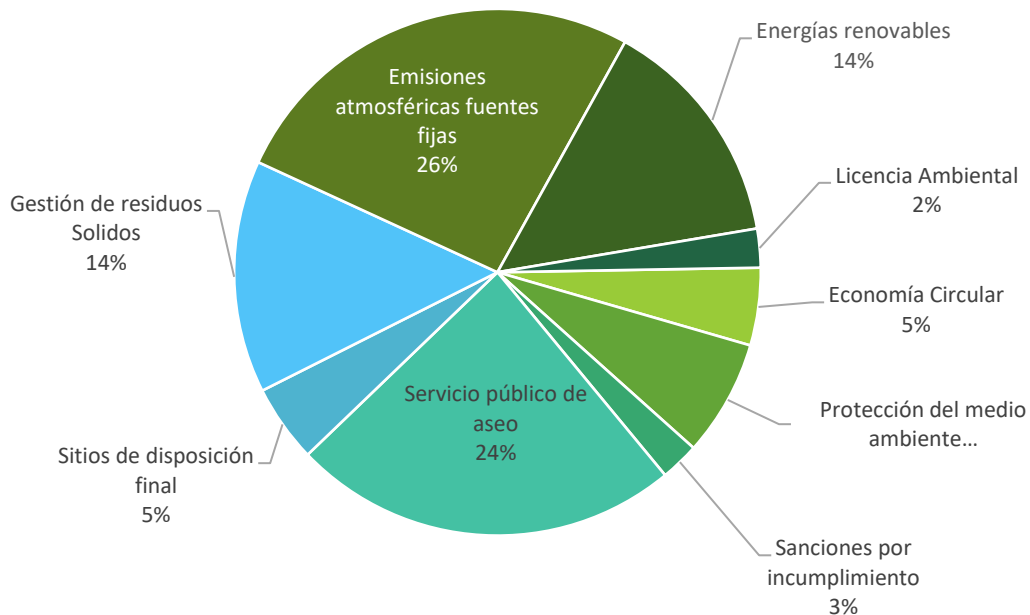
Cabe aclarar que los análisis previos se abordaron con base en las estimaciones calculadas sin involucrar el cumplimiento de la meta establecida a nivel país para el año 2030 de aumentar la tasa de reciclaje y nueva utilización de residuos sólidos al 17,9%, por lo tanto de lograrse tal cometido y entendiendo que buena parte de los residuos valorizables energéticamente pueden ser reciclados el escenario se modificaría reportando, un promedio de 1.830.825 toneladas de residuos sólidos urbanos anuales valorizables energéticamente, que producirían en promedio 387 GW/Ton/año.

4.3. Normatividad aplicable a la gestión de RSU por medio de alternativas de valorización energética de RSU

En Colombia las entidades estatales encargadas de atender los temas relativos a la gestión de RSU y la generación de energía corresponden a; el Ministerio de Minas y Energía, y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, apoyándose en sus entidades adscritas; Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) y IDEAM. En Bogotá, las entidades responsables de regular el servicio público de aseo y sus subsistemas es la Secretaria Distrital de Ambiente (SDA) y la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos (UAESP).

Desde la Ley 23 de 1973, el Gobierno Nacional a través de sus entidades, crea normas e instrumentos que controlan y previenen la contaminación del medio ambiente y da directrices para la medición y supervisión de las actividades humanas que puedan deteriorarlo, y es, desde esta ley, donde se desprenden aproximadamente 42 documentos normativos entre, leyes, decretos, resoluciones, documentos CONPES y documentos técnicos de soporte emitidos por los diferentes ministerios y entidades que intervienen, para regular algunos de los aspectos que se verían impactados en referencia a la gestión de residuos y la posibilidad de implementar tecnologías de valorización energética de los mismos.

Gráfico 8. Análisis de normatividad aplicable a los posibles proyectos de valorización energética de residuos



Fuente: Elaboración propia (2020)

En el Gráfico 8 es posible observar en términos de porcentaje los documentos regulatorios revisados y que están relacionados en la Tabla 11, y cuáles son los temas atendidos, encontrando que el que cuenta con mayor regulación es el relativo a fuentes fijas de emisión atmosférica (26% de los documentos consultados), seguido de lo correspondiente a servicio público de aseo (24% de los documentos consultados), y posteriormente lo asociado a las energías renovables (14% de los documentos consultados). Temáticas en relación con la gestión de residuos sólidos tienen una participación del 14% y protección del medio ambiente un 7%. En materia de normatividad resulta limitada la cantidad de regulación en consideración de los sitios de disposición final de residuos, las sanciones por incumplimiento y la economía circular (3% de los documentos consultados). En la Tabla 11 previamente presentada, se refiere la normatividad analizada que tendría injerencia sobre el desarrollo de proyectos de valorización energética de residuos.

4.4. Selección de una alternativa de valorización energética de residuos sólidos para la ciudad de Bogotá implementando el método multicriterio de análisis jerárquico AHP.

A continuación se procederá con el desarrollo del Análisis Jerárquico Multicriterio (AHP, por sus siglas en inglés) que soportará la selección de una alternativa de valorización energética de RSU para la ciudad de Bogotá, vinculando diferentes criterios de las dimensiones técnica, ambiental y social; y considerando los pasos establecidos desde el Manual metodológico de evaluación multicriterio para programas y proyectos del Instituto Latinoamericano de Planificación Económica y Social – ILPES (2008).

4.4.1. Definición del problema

La condición que se espera resolver es plantear una alternativa teórica de valorización energética de RSU para la ciudad de Bogotá aportando de esta manera a mejorar la gestión de RSU en la ciudad, el Análisis Jerárquico Multicriterio abordado en esta investigación contempla como meta, definir una alternativa de valorización energética para el manejo de los RSU en la ciudad de Bogotá

4.4.2. Definición de criterios

Los criterios que alimentan la toma de decisión se respaldan en considerar las dimensiones de la sostenibilidad; correspondientes a las temáticas ambiental, económica y social, junto con dos aspectos adicionales, el primero relacionado con la cantidad de residuos que se producen en la ciudad, y el segundo con las especificidades técnicas de cada alternativa. Bajo este escenario se espera plantear una opción por medio de la cual, resultaría posible gestionar los residuos (recursos) manteniéndolos en el sistema productivo maximizando entonces su valor económico y contribuyendo así, a minimizar las presiones sobre el medio ambiente actualmente generadas debido a la predominancia de un esquema de aprovechamiento “lineal” en el que se extraen los recursos, se aprovechan, se desechan y se disponen en un relleno sanitario, para posteriormente volver a extraer y así satisfacer las necesidades de los habitantes (Ddiba,D., Anderson,K., y Ogol,T, 2018).

4.4.2.1. Cantidad de RSU

El criterio asociado a la cantidad y tipo de RSU corresponde a la caracterización de tales residuos en consideración de su composición de acuerdo con, (Moratorio, D., Rocco, I y Castelli, M, 2012), se configura en un elemento fundamental para establecer el potencial de generación energética de los mismos razón por la cual da cabida a evaluar la pertinencia o no de implementar una alternativa de valorización energética, “se debe asegurar la disponibilidad de combustión autotérmica (combustión autosostenida sin la necesidad de agregar combustibles adicionales) de RSU” (Mutz, Hengevoss, Hugi, & Gross, 2017, pág. 51)

4.4.2.2. Aspectos técnicos

Este criterio vincula en la toma de decisión los aspectos relativos a las características, especificaciones y procedimientos técnicos de la puesta en marcha de las tecnologías evaluadas en consideración de los siguientes subcriterios (Mutz, Hengevoss, Hugi, & Gross, 2017)

- Tipo de residuos. Se refiere al tipo de residuos idóneos a destinar para la valorización energética de acuerdo con su composición.

- Preprocesamiento. Corresponde a la necesidad que tiene la alternativa de vincular en su proceso una fase de tratamiento previo que transforme los residuos valorizables en elementos o mezclas adecuadas para su inclusión en el sistema.
- Capacidad de reducir el volumen de RSU a disponer. Se refiere a la capacidad que tiene la alternativa de minimizar la cantidad de residuos sujetos a disposición final.
- Producto final. Se refiere al tipo de energía que produce la alternativa de valorización energética.
- Cantidades adecuadas para el sistema. Corresponde a considerar los volúmenes de residuos disponibles que hagan aceptable el costo asumido para la instalación de una u otra alternativa (Mutz, Hengevoss, Hugi, & Gross, 2017).

4.4.2.3. *Dimensión ambiental*

El manejo de los RSU por medio de tecnologías que conducen a su recuperación energética aunque reviste de beneficios en términos de la gestión de residuos y de generación de energía, también refiere la aparición de impactos adversos de tipo ambiental, asociados principalmente a las emisiones que son producidas al someter tales residuos a la transformación energética y que son expulsadas a la atmósfera, revistiendo especial importancia aquellas emisiones que tienen la potencialidad de configurarse como gases de efecto invernadero (GEI). Adicionalmente, el proceso también producirá residuos sólidos que dependiendo de su condición podrán ser reutilizados siempre que no revistan de peligrosidad (AEVERSU, 2015, pág. 43). A continuación, se listan los subcriterios considerados en esta dimensión.

- **Emisiones y Gases Efecto Invernadero.** Refiere el tipo de sustancias o componentes que serán expulsados a la atmósfera al poner en marcha la alternativa de valorización energética, el resultado de tales emisiones estará relacionado con el tipo de residuos que se manejen a través de la alternativa. Dentro de las emisiones los GEI corresponden a aquellas emisiones atmosféricas que contribuyen a la generación del calentamiento global, el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) atribuye la generación de este tipo de emisiones al desarrollo de las diferentes actividades humanas y entre esta lista son considerados entre los principales “el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄); el óxido nitroso (N₂O); los fluoro carbonados (CCL₂F₂); los

hidrofluorocarbonados (CCL_2F_2); perfloroetano (C_2F_6); el hexafluoruro de azufre (SF_6); y el vapor de agua” (Becerra, M, y Mance, H, 2009, pág. 11).

- **Residuos sólidos producto del proceso:** La transformación energética de los RSU produce algunos residuos sólidos como remanentes del proceso que deben ser tratados o dispuestos adecuadamente, por ejemplo, la incineración que produce cenizas volantes (fly ash) y escorias considerados residuos peligrosos; la gasificación se produce el char y las cenizas que se extraen del gasificador a través de los equipos de control de emisiones (Castells X. E., 2005).
- **Residuos potencialmente reutilizables.** El proceso de valorización energética una vez implementado producirá un remanente de residuos sólidos que no pueden ser aprovechados energéticamente, entre estos, las escorias, cenizas y chatarra; las primeras y segundas pueden ser reutilizadas en obras civiles, y las terceras de contenido ferroso podrán ser reincorporadas a la industria metalúrgica; en todos los casos mientras que los residuos no sean catalogados como peligrosos podrán disponerse en rellenos sanitarios. (AEVERSU, 2015, pág. 43).

4.4.2.4. Dimensión económica

La puesta en marcha de una alternativa de valorización energética debe contemplar su viabilidad en términos de los costos que se deberán asumir para su instalación y puesta en marcha, así como también los necesarios para su operación y mantenimiento a lo largo del tiempo, por lo tanto los subcriterios a considerar corresponden a los siguientes (Qazi & Abushammala, 2020, pág. 309).

- **Costos de capital.** Relativos a los montos de dinero que cada alternativa requiere, para su montaje (adquisición de tierras, maquinaria, equipo e insumos), es decir la inversión que se realizaría para poner en marcha la tecnología.
- **Costos de operación y mantenimiento.** Hace referencia a la disponibilidad de recursos necesarios para lograr su funcionamiento en el tiempo asumiendo costos de mantenimiento y todos aquellos asociados a su operación (costo de procesar los residuos, costos asociados a la automatización, etc.).

4.4.2.5. Dimensión social

La sociedad vincula un elemento importante a la hora de tomar una decisión en relación con la valorización energética reconociendo que son las personas quienes se configuran en los receptores de los impactos positivos y/o negativos que producirá tal decisión, por lo tanto, los subcriterios a considerar para esta dimensión corresponden a los que se listan a continuación:

- **Aceptación social.** La percepción de la sociedad respecto a la conveniencia o no de una alternativa de valorización energética de RSU debe ser contemplada en la toma de decisión ya que se configura en un elemento crítico para su funcionamiento que en caso de no tratarse se configuraría en una posible talanquera de los procesos. (Achillas, Ch., Vlachokostas, Ch. Moussiopoulos, N., Banias, G y Karagiannidis, A., 2011, pág. 858).
- **Especialidad de la mano de obra.** La especialidad y experiencia de la mano de obra que requiere la instalación y operación de las alternativas de valorización energética es un aspecto para considerar debido a que se configura en determinante para lograr una adecuada gestión (Mutz, Hengevoss, Hugi, & Gross, 2017, pág. 52)

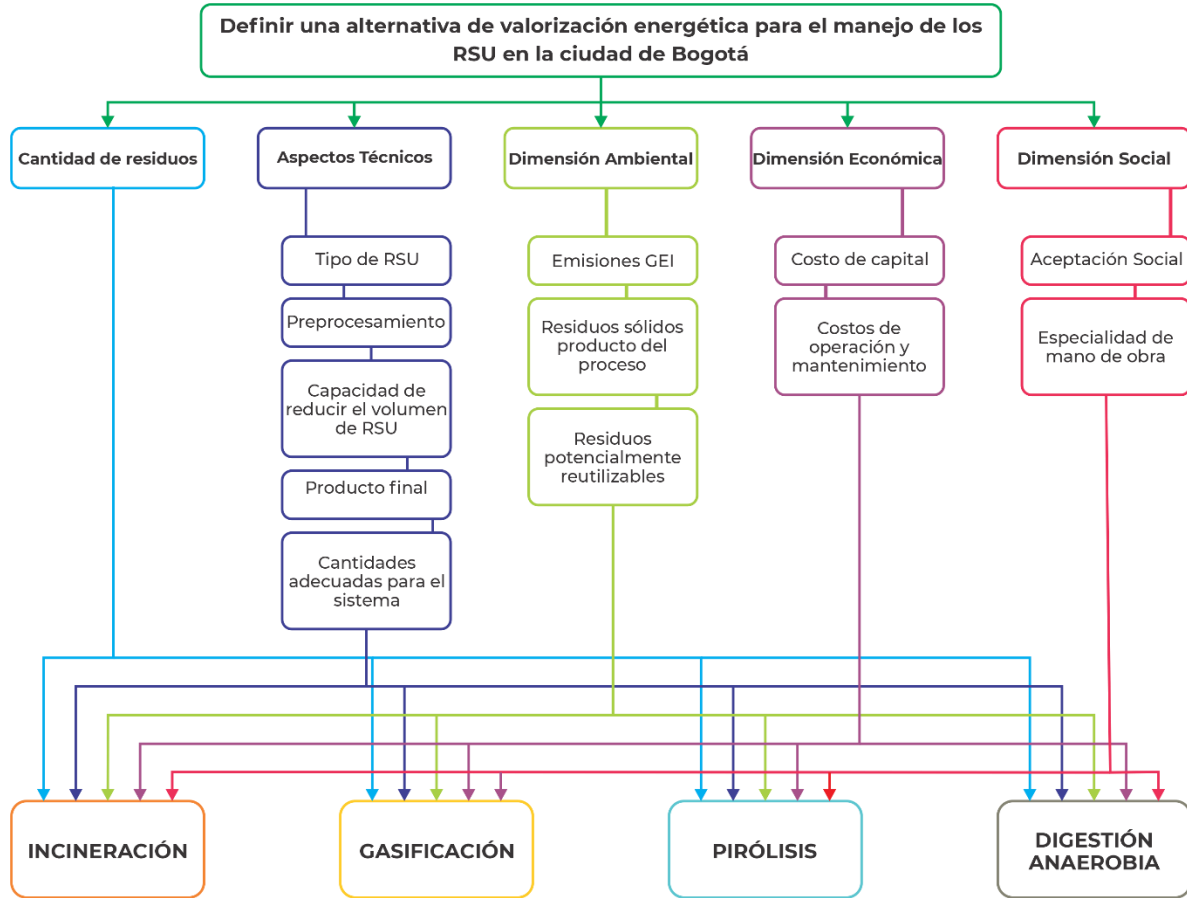
4.4.3. Identificación de alternativas

Las alternativas de valorización energética de RSU que serán consideradas en el desarrollo del análisis jerárquico multicriterio corresponden a la incineración, la gasificación, la pirolisis y la digestión anaeróbica, tales alternativas han sido caracterizadas de manera cualitativa a partir de información secundaria en secciones previas del documento (Ver secciones Descripción de alternativas de valorización energética de RSU y Recabar información en relación con los RSU de la ciudad de Bogotá).

Una vez definido el objetivo, los criterios que contemplan las dimensiones relevantes para lograr un escenario de sostenibilidad en la toma de decisión y las alternativas a considerar como posibilidades para lograr la meta, resulta posible desglosar el problema en un esquema jerárquico separándolo en consideración de los aspectos relevantes para la toma de decisión que aportan a la solución. En el Diagrama 13 se observa el esquema

jerárquico de la toma de decisión, así como también el grupo de criterios y subcriterios que serán vinculados.

Diagrama 13. Esquema Jerárquico para la toma de decisión



Fuente: Elaboración propia (2020)

4.4.4. Evaluación de alternativas

La evaluación de alternativas procede dando paso, en primer lugar, a la selección del grupo de expertos que emitirá sus juicios en consideración de su experiencia y conocimiento, tales juicios son generados por medio de comparaciones binarias planteando el criterio determinante sobre una propiedad común (Saaty, T, 2013, pág. 1101).

Selección de expertos

La selección de expertos que participó en la configuración del análisis Jerárquico Multicriterio se abordó, primero teniendo en cuenta la participación del sector académico representado por profesores que actualmente se encuentran vinculados con la universidad EAN y que son considerados referentes en temas de sostenibilidad, y segundo por medio de redes profesionales en donde se logró la vinculación de personas que refieren experiencia tanto en temas de sostenibilidad como también en los relativos a la gestión de energías renovables y manejo de residuos, logrando consolidar la participación de nueve expertos. La decisión de vincular estos criterios para determinar los participantes se basó en la importancia que tiene la gestión de residuos sólidos urbanos en el marco de contribuir a que Bogotá se configure a futuro en una ciudad cada vez más sostenible de ampliando el escenario a una visión que no se limitará a una de tipo técnico.

Respecto a esta selección es pertinente indicar que en una primera fase se buscó la participación de tantas personas como fuese posible involucrar, considerando lo mencionado en el párrafo previo, y aunque la invitación al proceso fue remitida a más de 20 posibles participantes solamente fue se obtuvo la colaboración de 9 personas

A continuación, se refiere la lista de expertos que participan en el análisis multicriterio para seleccionar una alternativa de valorización energética para el manejo de los RSU en la ciudad de Bogotá.

- Mario Andrés Hernández Pardo

Ingeniero Químico de la Universidad Industrial de Santander (2004), Maestría en Ingeniería Civil y Ambiental, con énfasis en residuos sólidos de la Universidad de los Andes (2008) y PhD en Ingeniería, con énfasis en energía y ambiente del École des Mines de Nantes (2012). Profesor titular de la Universidad EAN, donde trabaja en proyectos para la valorización de la biomasa residual agroindustrial a través de digestión anaerobia y fermentación oscura. Tiene experiencia en proyectos con el sector agropecuario para la evaluación, diagnóstico y planteamiento de estrategias enfocadas a la producción de biogás. Director y coordinador del proyecto para aprovechamiento

integral de la biomasa residual en un esquema de biorrefinería para la producción de energía, subproductos de valor agregado y materiales.²

- William Alarcón

Profesional en Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, Magíster en Procesos Industriales Ingeniería Ambiental de la Universidad Complutense de Madrid, España, Magíster en ISO 14001 con énfasis Procesos Ambientales Empresariales de Vrije Universiteit Amsterdam, Holanda, Doctor en Ingeniería de Procesos Ambientales – Materiales Compuestos de la Universidad de Ciencias Aplicadas de Frankfurt, Alemania.

Amplia experiencia como formulador y consultor de proyectos de obras civiles y proyectos de edificaciones, ejecutados en materiales compuestos y avanzados, al haber desempeñado labores como Investigador Senior Master del Centro de Innovación, Desarrollo e investigación en la empresa ACCIONA INFRAESTRUCTURAS, Constructora Española - alemana.

Trabajó como consultor en el Instituto de Desarrollo Urbano – IDU en temas de manejo productivo y aprovechamiento de los residuos de construcción y demolición – RCD a generarse durante la construcción del proyecto de la primera línea del Metro de Bogotá en el año 2014

Actualmente lidera y coordina el tema de la gestión de los residuos de construcción y demolición – RCD y asfaltos modificados, desde la gerencia ambiental del Instituto de Desarrollo Urbano – IDU instituyendo áreas de investigación, desarrollo e innovación en los campos de nuevas tecnologías en el sector de construcción de obras civiles, espacio público y mobiliario urbano.

- Claudia Lorena Suarez Marmolejo

Ingeniera ambiental de la Universidad Central del Valle del Cauca (Tuluá, Colombia), Magister en; Ingeniería sanitaria y ambiental de la Universidad del Valle (Cali, Colombia) y en Dirección y gestión de proyectos, del Instituto Europeo de Posgrados - Escuela de Negocios de Madrid, docente de la Universidad de Caldas, y Gerente Estudios e Ingeniería Ambiental S.A.S en Medellín ³

² <http://redbiolac.org/personnel/mario-andres-herandez-pardo/>

³ http://scienti.colciencias.gov.co:8081/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001005294

- Yaniro Gabriel Medina Moncayo

Ingeniero civil de la Universidad de Nariño. 25 años de experiencia profesional asesorando a entidades del sector público, privado y multilateral en aspectos sociales y de sostenibilidad ambiental. Se ha desempeñado como consultor del Programa de las Naciones Unidas (PNUD), profesional especializado de la división de política ambiental y corporaciones Autónomas Regionales del Departamento Nacional de Planeación (DNP). También ha sido subdirector de seguimiento y monitoreo del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). Es socio-fundador y gerente técnico de Ambiental Consultores & Cía. Ltda. Igualmente, se ha desempeñado como docente en las universidades: Universidad de Sergio Arboleda, Universidad Militar Nueva Granada, Universidad Antonio Nariño, Escuela Superior de Administración Pública (ESAP), Universidad Pontificia Javeriana y Universidad Industrial De Santander.⁴ Medina Moncayo ha realizado estudios complementarios en la maestría en ingeniería ambiental y sanitaria de la Universidad Nacional de Colombia.

- María Cristina Rodríguez Villera.

Trabajadora Social de la Universidad Externado de Colombia y Magíster en Sistemas de Vida Sostenible de la Universidad Externado de Colombia, actualmente docente de la Universidad EAN.

- Enrique Edgardo Guilles Romero

Economista de la Universidad de la República (Montevideo, Uruguay). Magister en Economía del Medio Ambiente, los Recursos Naturales, la Energía y la Agricultura de la Université de Toulouse (Francia). PhD en Economía de la misma universidad. Se ha desempeñado como docente e investigador en universidades de Uruguay, Francia y Colombia en las áreas de macroeconomía, economía internacional y economía política. Ha participado como ponente en congresos nacionales e internacionales y tiene publicaciones en las áreas mencionadas. En el ámbito profesional, cuenta con experiencia en consultoría y en dirección de empresas.⁵

⁴ <https://pagina10.com/web/experto-en-medio-ambiente-yaniro-gabriel-medina-moncayo-es-el-personaje-10-del-dia/>

⁵ <https://plu.mx/ean/u/egillesromero>

- Jorge Arturo Calderas Winder

Licenciado en Derecho con Especialización en Derecho Administrativo, desde 2019 cursa la Especialización en Derecho Energético, impartida por la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Derecho de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), donde ha tenido la oportunidad de ampliar sus conocimientos sobre la cadena de valor de los hidrocarburos (upstream, midstream y downstream), electricidad, energías renovables y cambio climático (Agenda 2030 y Objetivos de Desarrollo Sostenible), lo cual ha fortalecido al haber tomado los cursos impartidos por IFP School y el Instituto Mexicano del Petróleo, sobre "Transición energética" y "Conocimiento del Negocio del Subsector Hidrocarburos dentro del contexto actual", respectivamente. Actualmente se desempeña como Subdirector de Área para la Secretaría de Energía de México.

- Carlos Andrés Forero Rodríguez

Ingeniero mecánico de la Universidad de Los Andes, Magister en Gestión de la energía y el medio ambiente, de la Universidad Politécnica de Madrid con experiencia en la implementación de proyectos de biocombustibles a partir de residuos agrícolas, implementación solar fotovoltaica y selección y soporte técnico de equipos de bombeo y HVAC.⁶

- Eduar Jovan Mendoza Acevedo

Ingeniero Ambiental y Sanitario y Especialista en Sistemas Integrados de Gestión de la Universidad Pontificia Bolivariana, Magíster en Conservación y Uso de la Biodiversidad de la Universidad Javeriana y en Cambio Climático de la Universidad Internacional Iberoamericana, experto en procesos de licenciamiento ambiental e implementación de proyectos en la industria de los hidrocarburos.

Importancia de los criterios - Juicios de valor

Se asigna la importancia relativa de los criterios en consideración de la escala fundamental de números absolutos o escala de Saaty, previamente referida (ver Tabla 16) estableciendo entonces cuál de los criterios resulta más importante para tomar una decisión sobre la selección de una alternativa teórica de valorización energética para gestionar los RSU en la ciudad de Bogotá, tal proceso se aborda también con los subcriterios determinados. *“Las calificaciones de los criterios se proporcionaron en función*

⁶ <https://www.linkedin.com/in/carlos-forero-r/>

de la importancia relativa de cada uno con respecto a los demás criterios. La suma de todos los criterios de calificación equivaldrá a uno, ya que representa el porcentaje distribuido total” (Almanaseer, Bassim Abbassi, Friesen, & Nestico-Semianiw, 2020, pág. 34) A continuación, en la Tabla 34, se presentan los resultados obtenidos respecto a la importancia relativa (priorización) de cada uno de los criterios y subcriterios comparados. resultantes del vector de priorización consolidado una vez los juicios del panel de expertos fueron finalizados.

Tabla 34. Priorización de criterios considerados para la toma de decisión

CRITERIOS	Prioridad Global – Criterio (a)	Subcriterios	Prioridad Global – Subcriterio (b)	Prioridad Global (a*b)
Cantidad de RSU	0,212	N/A	0,212	21,2%
Aspectos técnicos	0,215	Tipo de RSU	0,344	7,4%
		Preprocesamiento	0,184	4,0%
		Capacidad de reducir el volumen de RSU	0,18	3,9%
		Producto Final	0,176	3,8%
		Cantidades adecuadas para el sistema	0,117	2,5%
Dimensión Ambiental	0,332	Emisiones y GEI	0,584	19,4%
		Residuos sólidos producto del proceso	0,199	6,6%
		Residuos potencialmente reutilizables	0,217	7,2%
Dimensión Económica	0,12	Costos de Capital	0,374	4,5%
		Costos de Operación y Mantenimiento	0,626	7,5%
Dimensión Social	0,121	Aceptación Social	0,573	6,9%
		Especialidad de Mano de Obra	0,427	5,2%

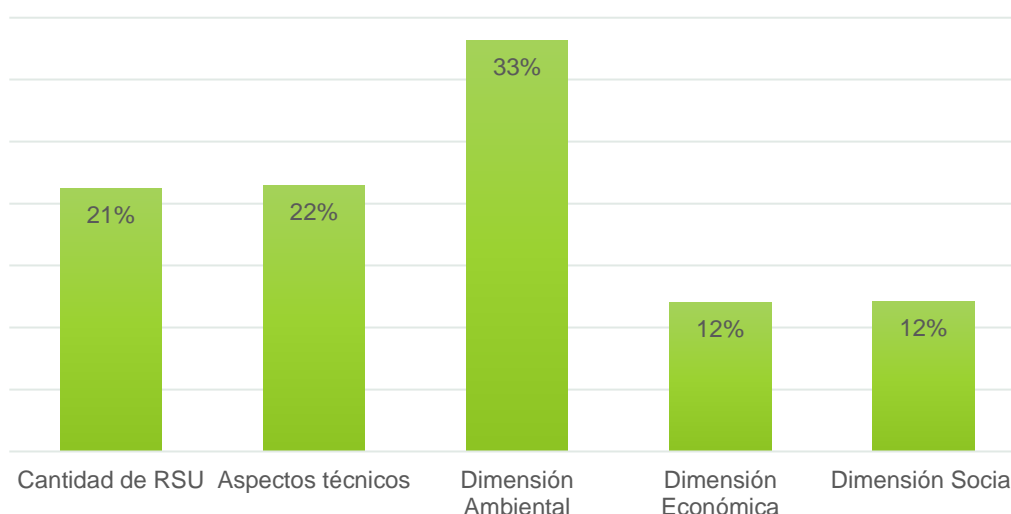
Fuente: Elaboración propia (2020)

Lo anterior fue posible abordando un análisis por pares en donde los expertos expresan sus opiniones realizando comparaciones binarias en consideración de cada criterio, y subcriterio sustentado en la información científica y técnica que posee el panel de expertos en consideración de su experiencia. Cada miembro del panel reflejó su preferencia asignando un valor numérico a la luz de la escala, definida por Saaty, esta información permite evidenciar la priorización de un grupo de criterios y subcriterios considerados importantes para soportar la toma de decisión y es procesada por medio de

la herramienta online AHP Online System – AHP. OS (Goepel, K.D., 2018b), durante los meses de septiembre y octubre de 2020.

Como resultado de la priorización de criterios en el Gráfico 9 (elaborado a partir de los datos presentados en la Tabla 34), se observa que el criterio que mayor prioridad global obtiene, es la dimensión ambiental entendiendo entonces que para el panel de expertos en conjunto resulta altamente importante a la hora de tomar una decisión considerar los impactos adversos que la implementación de una tecnología de valorización energética de residuos sólidos en la ciudad de Bogotá tendría sobre el medio ambiente.

Gráfico 9. Prioridad Global de Criterios

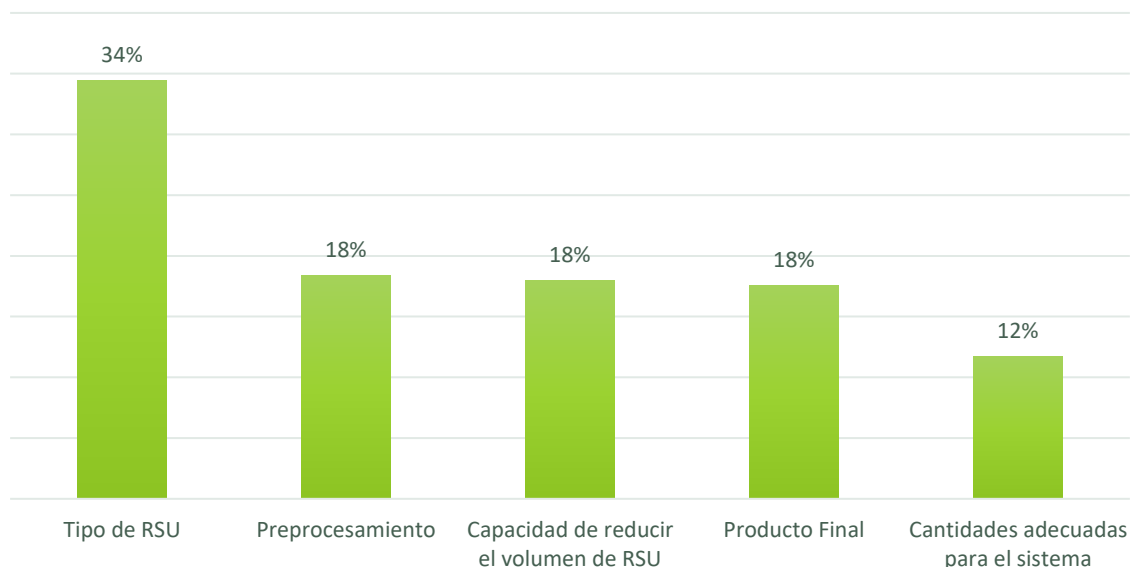


Fuente: Elaboración propia (2020)

Por su parte se evidencia además que los criterios de Cantidad de RSU, Aspectos Técnicos para el panel de expertos obtienen importancias relativas similares planteando valores intermedios, mientras que la dimensión económica y social refleja la menor importancia relativa en el análisis abordado. Una vez obtenido el vector de prioridad en relación con los criterios se procedió con el cálculo del coeficiente de consistencia, obteniendo un valor de 0,016 evidenciando que para el resultado de la priorización global de criterios no hay contradicción ya que resulta menor que 0,10.

En referencia a los resultados obtenidos sobre la priorización de los subcriterios a continuación se presentan las gráficas elaboradas a partir de la información consolidada en en la Tabla 34.

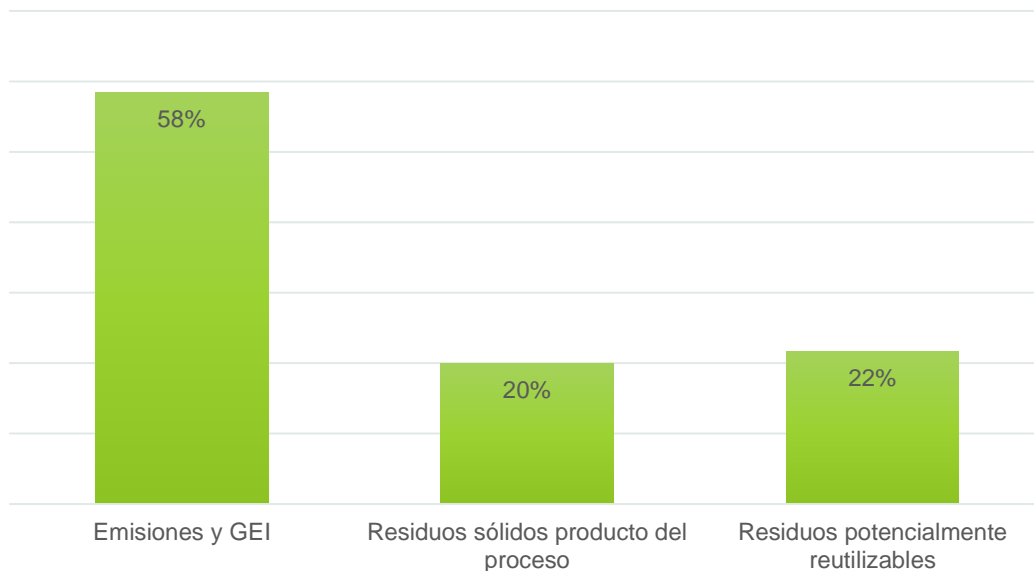
Gráfico 10. Priorización consolidada de los subcriterios relacionados con el criterio de aspectos Técnicos



Fuente: Elaboración propia, 2020

En el Gráfico 10, se observa la priorización consolidada de los subcriterios relacionados con el criterio de Aspectos Técnicos, encontrando que para los expertos la importancia más alta a la hora de tomar la decisión es otorgada al tipo de residuos idóneos para la puesta en marcha de una u otra alternativa de valorización energética (34%), las siguientes prioridades obteniendo importancias iguales son la capacidad que tendrá la alternativa de reducir el volumen de RSU a disponer, el preprocesamiento y el producto final que se generaría (18%), y finaliza el vector de prioridades, con la importancia que le otorgan a las cantidades de residuos a gestionar que harán aceptable el costo asumido para la instalación de una u otra alternativa (12%). Una vez obtenido el vector de prioridad en relación con los subcriterios se procedió con el cálculo del coeficiente de consistencia, obteniendo un valor de 0,015 evidenciando que para el resultado de la priorización global de criterios no hay contradicción ya que resulta menor que 0,10.

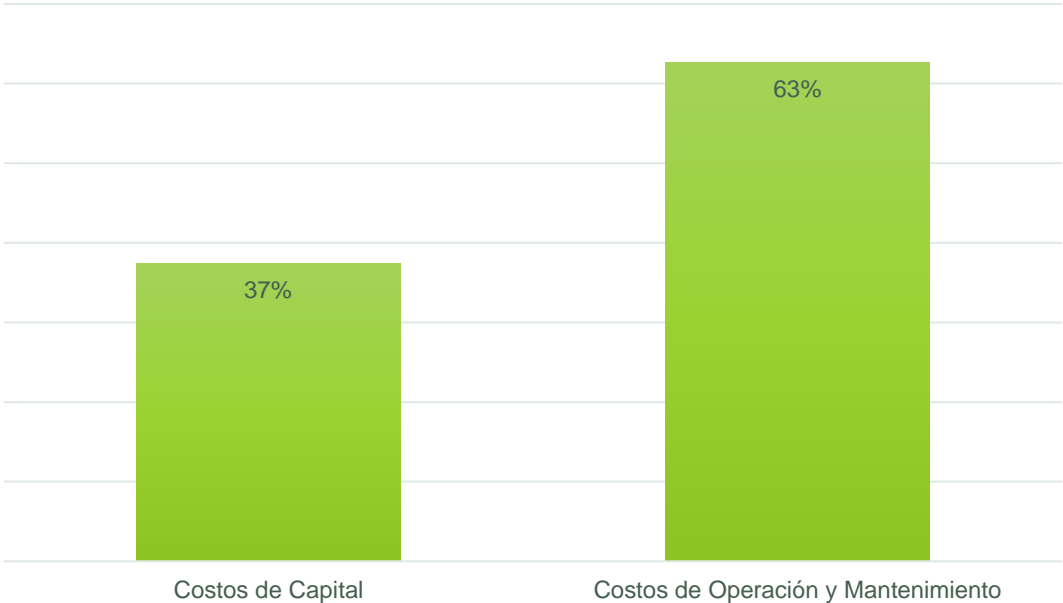
Gráfico 11. Priorización consolidada de los subcriterios relacionados con el criterio Dimensión Ambiental



Fuente: Elaboración propia (2020)

En el Gráfico 11, se vinculan los subcriterios relativos al criterio de Dimensión Ambiental, en la priorización global de los criterios corresponde a la que mayor importancia otorgan los expertos, en el marco de esta dimensión resulta como subcriterio más importante el relacionado con las emisiones atmosféricas y la producción de gases efecto invernadero (58%), para el panel de expertos esta condición resulta altamente sensible al tomar una decisión sobre la implementación de una u otra alternativa de valorización energética, la generación de residuos potencialmente reutilizables (22%) obtiene el segundo nivel de importancia para el panel de expertos otorgando una importancia media en la dimensión ambiental a la posibilidad de vincular nuevamente ciertos materiales residuales a los ciclos productivos, finalmente otorgan la importancia más baja a los residuos sólidos productos del proceso (20%) correspondientes a los remanentes que deberán ser dispuestos por su imposibilidad de reúso o por sus características de peligrosidad. Una vez obtenido el vector de prioridad en relación con los subcriterios se procedió con el cálculo del coeficiente de consistencia, obteniendo un valor de 0,011 evidenciando que para el resultado de la priorización global de criterios no hay contradicción ya que resulta menor que 0,10.

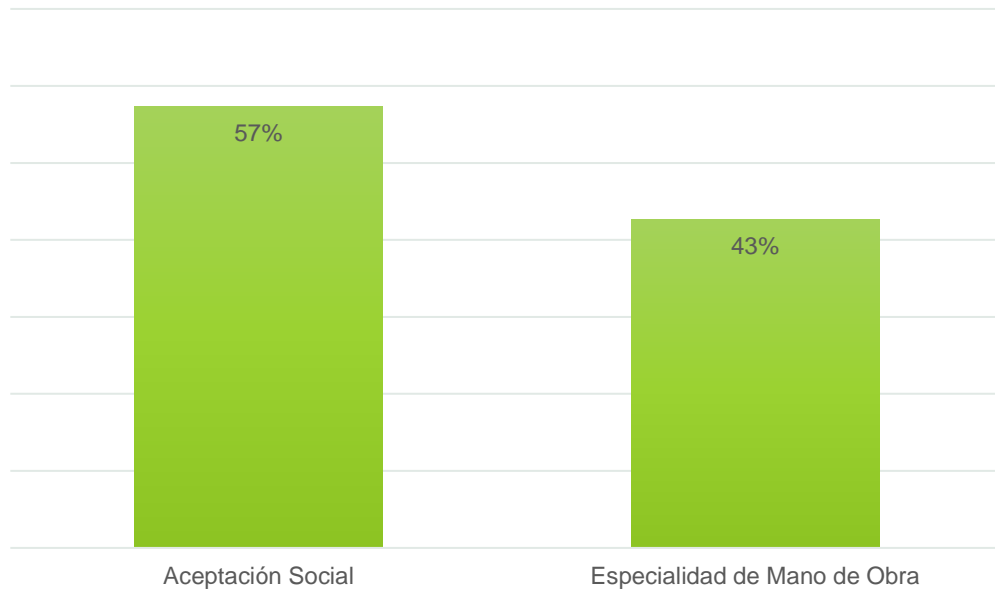
Gráfico 12. Priorización consolidada de los subcriterios relacionados con el criterio Dimensión Económica



Fuente: Elaboración propia (2020)

En el Gráfico 12, se presenta la priorización obtenida en consideración de los subcriterios vinculados al criterio de Dimensión económica, allí se evidencia la mayor importancia otorgada por parte del panel de expertos está dada para a los costos de operación y mantenimiento (63%), referidos a disponibilidad de recursos necesarios para lograr su funcionamiento en el tiempo asumiendo costos de mantenimiento y todos aquellos asociados a su operación,(costo de procesar los residuos, costos asociados a la automatización, etc.), por su parte el subcriterio de Costos de Capital (37%) obtiene una importancia menor y se relaciona con el monto de inversión que deberá asumirse para poner en marcha una u otra tecnología.

Gráfico 13. Priorización consolidada de los subcriterios relacionados con el criterio Dimensión Social

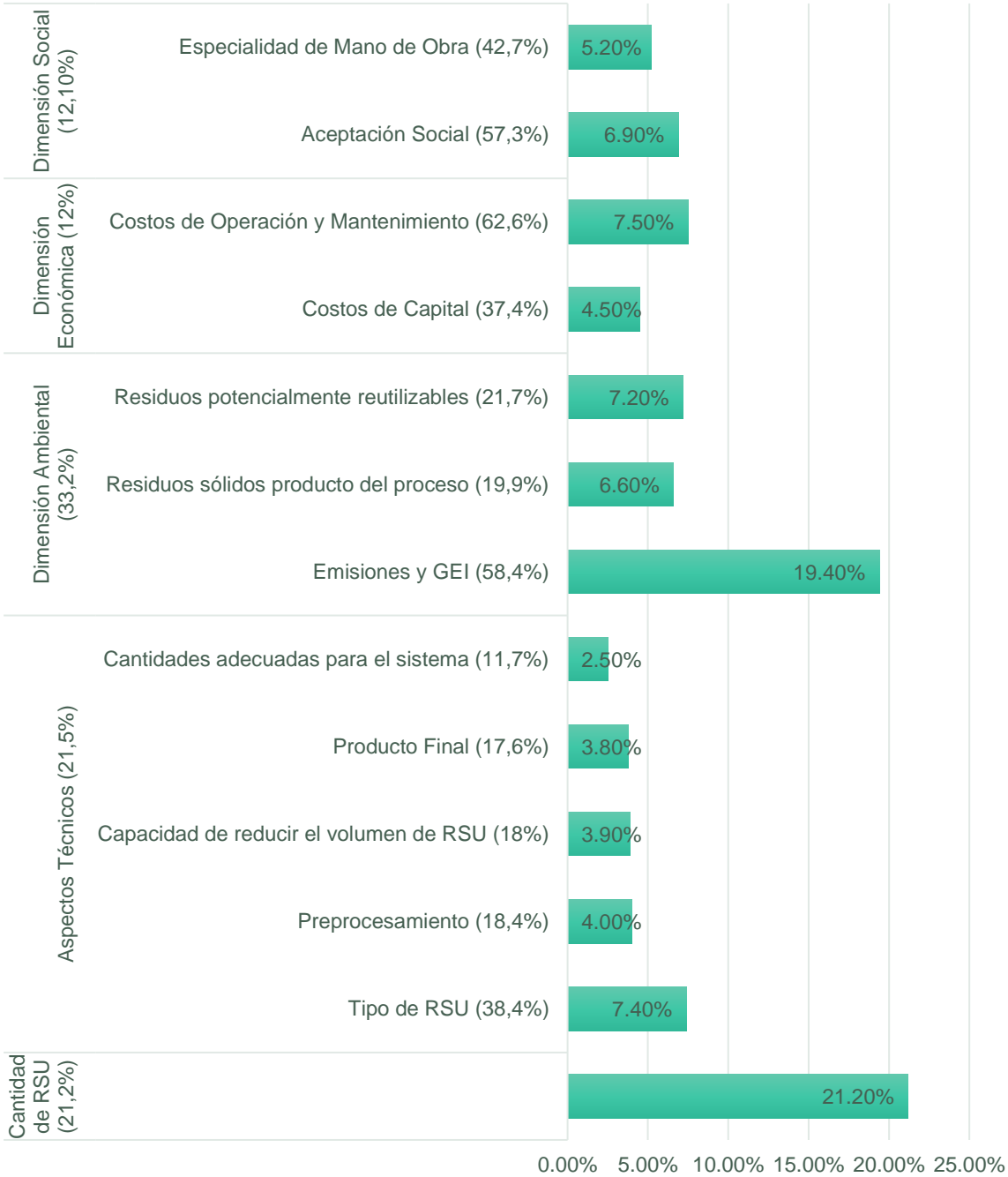


Fuente: Elaboración propia (2020)

En el Gráfico 13, se consolidan los resultados relativos a los subcriterios del criterio Dimensión Social, observando que el panel de expertos considera como más importante, el criterio de Aceptación social (57%) asociado a la percepción que las personas tendrían sobre la conveniencia o no de la implementación de una alternativa u otra y le otorgan una menor importancia a la necesidad de mano de obra especializada (43%) para la puesta en marcha de la alternativa de valorización energética. Una vez obtenido el vector de prioridad en relación con los subcriterios tanto del criterio Dimensión Económica, como del criterio Dimensión Social se procedió con el cálculo del coeficiente de consistencia, obteniendo un valor de 0 evidenciando que para el resultado de la priorización global de criterios no hay contradicción ya que resulta menor que 0,10.

Con las prioridades definidas y consolidadas se obtiene el vector de prioridad global considerando cada criterio y subcriterio analizado, reflejando el resultado que se observa en el Gráfico 14, y que se elabora con base en la información consolidada en la Tabla 34.

Gráfico 14. Priorización Global para la toma de decisión sobre una alternativa de valorización energética de RSU para la ciudad de Bogotá



Fuente: Elaboración propia (2020)

Con base a lo presentado en el Gráfico 14, es posible indicar que para el panel de expertos los subcriterios más importantes a la hora de establecer una alternativa teórica de valorización energética para el manejo de los RSU en la ciudad de Bogotá corresponden en orden de importancia a la siguiente lista,

- Cantidad de RSU (21,20%)
- Emisiones y Gases Efecto Invernadero (19,4%)
- Costos de operación y mantenimiento (7,5%)
- Tipo de RSU (7,4%)
- Residuos potencialmente reutilizables (7,2%)
- Aceptación Social (6,9%)
- Residuos sólidos producto del proceso (6,6%)
- Especialidad de mano de obra (5,2%)
- Costo de Capital (4,5%)
- Preprocesamiento (4%)
- Capacidad de reducir el volumen de RSU (3,9%)
- Producto Final (3,8%)
- Cantidades adecuadas para el sistema (2,5%)

Ahora bien, con el vector de prioridades obtenido desde los análisis de comparación binaria realizados por el panel de expertos se procede a implementar la evaluación de las alternativas planteadas en consideración de las fichas técnicas incluidas en el Anexo 1. Fichas Tecnologías, y que consolidan las características clave de cada alternativa para así proceder con el análisis en consideración de cada subcriterio, tales fichas técnicas son elaboradas gracias al desarrollo de la fase cualitativa de esta investigación en donde fue posible recolectar y analizar datos provenientes de fuentes secundarias relativos primero a las características de las alternativas de incineración, gasificación, pirolisis y digestión anaeróbica y segundo relacionados con la caracterización de RSU, esto permite contar con información que contextualiza el escenario de valorización energética y facilita el análisis e interpretación de datos en el proceso de evaluación de las alternativas en el escenario de la ciudad de Bogotá

“Cuando las prioridades de los elementos en cada nivel se tienen definidas, se agregan para obtener las prioridades globales frente al objetivo principal. Los resultados frente a las alternativas se convierten entonces en un importante elemento de soporte para quien debe tomar la decisión”. (Osorio, J. y Orejuela, J, 2008, pág. 248)

A continuación, la Tabla 35 se elabora con el fin de presentar los resultados obtenidos al realizar las comparaciones pareadas de cada una de las alternativas de valorización energética consideradas en la toma de decisión para la ciudad de Bogotá, con relación a cada uno de los subcriterios incluidos en el esquema jerárquico.

Tabla 35. Matriz de priorización de alternativas en consideración de los criterios y subcriterios vinculados en la toma de decisión

Priorización de criterios				INCINERACIÓN	GASIFICACIÓN	PIRÓLISIS	DIGESTIÓN ANAERÓBICA		
Priorización de criterios	Cantidad de RSU	0,212	21,2%	63%	12%	12%	12%		
	Aspectos técnicos	0,215	Tipo de RSU	0,344	7,4%	70%	13%	13%	5%
			Preprocesamiento	0,184	4,0%	68%	8%	8%	16%
			Capacidad de reducir el volumen de RSU	0,18	3,9%	16%	40%	40%	5%
			Producto Final	0,176	3,8%	16%	40%	40%	5%
			Cantidades adecuadas para el sistema	0,117	2,5%	72%	10%	10%	9%
	Dimensión Ambiental	0,332	Emisiones y GEI	0,584	19,4%	14%	39%	39%	8%
			Residuos sólidos producto del proceso	0,199	6,6%	17%	39%	39%	5%
			Residuos potencialmente reutilizables	0,217	7,2%	9%	34%	47%	11%
	Dimensión Económica	0,12	Costos de Capital	0,374	4,5%	21%	8%	8%	63%
			Costos de Operación y Mantenimiento	0,626	7,5%	21%	7%	7%	65%
	Dimensión Social	0,12	Aceptación Social	0,573	6,9%	25%	25%	25%	25%
			Especialidad de Mano de Obra	0,427	5,2%	16%	7%	7%	70%
				100%	33,7%	22,7%	23,6%	20,0%	

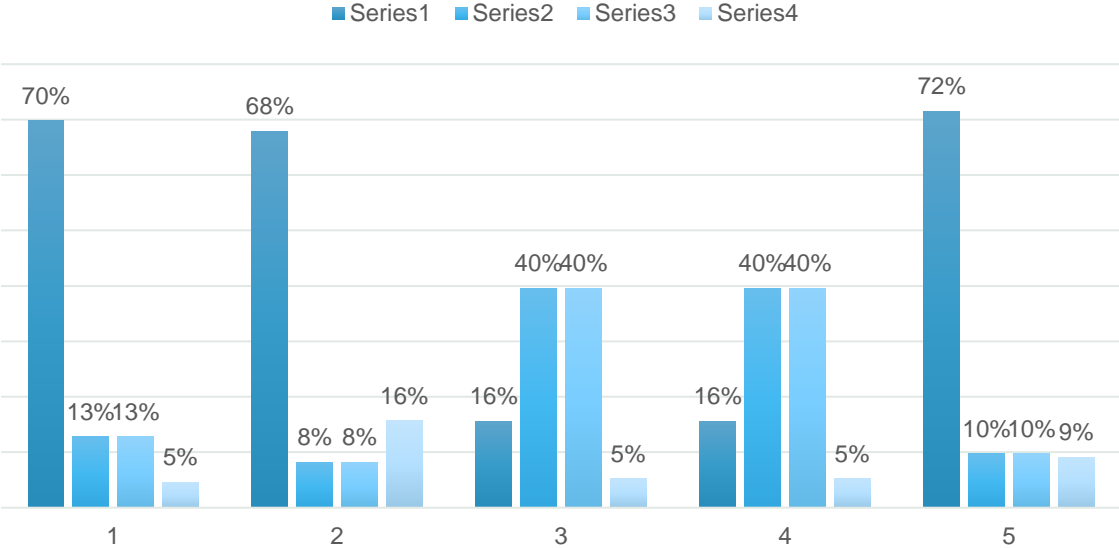
Fuente: Elaboración propia (2020)

En relación con el criterio relativo a la cantidad de RSU que tendría la capacidad de gestionar energéticamente cada una de las alternativas, resulta preferible la alternativa de incineración (63%) debido a que es la única con la capacidad de vincular en su proceso cualquier tipo de residuo generado en la ciudad, las alternativas de gasificación, pirolisis y digestión anaeróbica son consideradas similares ya que las tres podrán gestionar residuos sólidos urbanos, no obstante para su operación deben tenerse en cuenta ciertas condiciones que garanticen el funcionamiento de la tecnología (humedad, tipo de RSU, tamaño de partículas, entre otras).

El Gráfico 15, se elabora con base en los datos relacionados en la Tabla 35, con respecto al criterio de Aspectos Técnicos, sobre el cual se puede evidenciar que en consideración del subcriterio tipo de RSU resulta preferible la alternativa de incineración (70%) debido a que gestiona cualquier tipo de residuo, las alternativas de gasificación (13%) y pirólisis (13%) están en segundo orden de preferencia pues su proceso se enfoca en RSU a excepción de los materiales inertes, mientras que la alternativa de digestión anaeróbica (5%) solamente da manejo a los residuos orgánicos conllevando a que sea la menos preferente.

Frente al subcriterio de preprocesamiento resulta como la alternativa preferente la incineración (68%) pues para su puesta en marcha solamente requiere excluir de los RSU aquellos que son objeto de reciclaje, la digestión anaeróbica (16%) es preferida en segundo lugar debido a que aunque los residuos a manejar mediante esta necesitan un procedimiento de tratamiento previo, tal alternativa no tiene requerimientos detallados sobre humedad, mientras que la preferencia en relación con las alternativas de pirolisis (8%), y gasificación (8%) es la misma y resulta mucho menos preferente debido a que además de separar los residuos potencialmente reciclables es necesario preparar aquellos que serán valorizados implementando procedimientos adicionales encaminados a garantizar condiciones mínimas de humedad, además de triturar para contar con partículas de tamaños uniformes.

Gráfico 15. Priorización de alternativas en consideración de los subcriterios asociados al criterio Aspectos Técnicos



Fuente: Elaboración propia (2020)

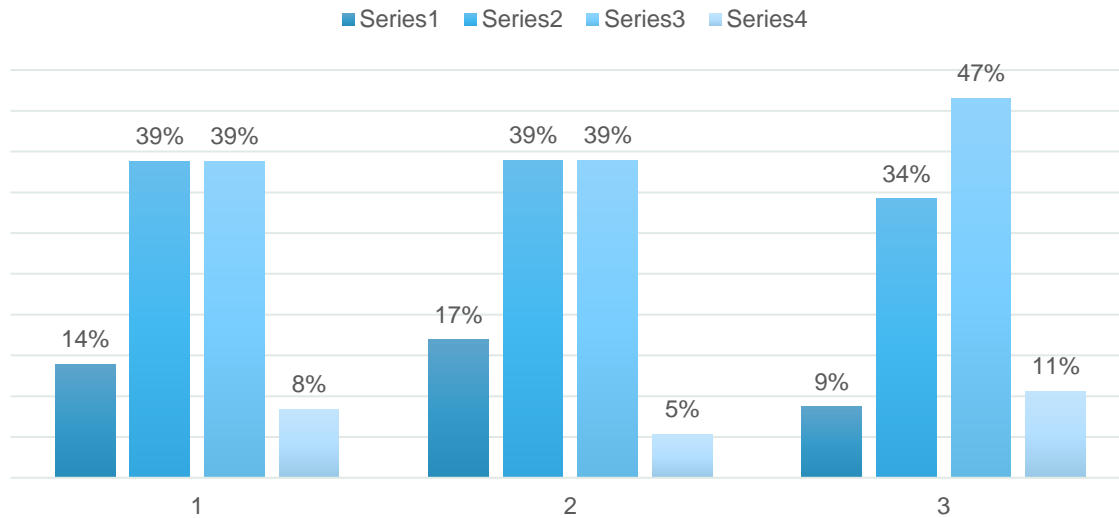
En relación con la capacidad de reducir el volumen de RSU resultarían preferentes las alternativas de gasificación (40%) y pirólisis (40%), con su uso se podría lograr disminuir hasta en un 90% la cantidad de RSU a disponer, le sigue la alternativa de incineración (16%) porque puede alcanzar una reducción de hasta el 80%, mientras que la digestión anaeróbica solamente podría reducir en 50% la cantidad de RSU a disponer.

Respecto al producto final que se obtiene del proceso de valorización energética, resulta preferente la alternativa de pirolisis y gasificación (40%), a través de esta es posible obtener Syngas y Bioaceite, luego la preferencia está dada por la incineración (16%) que produce calor y energía y finalmente la digestión anaeróbica (5%) que produce Biogás.

Finalmente, en relación con las cantidades adecuadas para el funcionamiento del sistema es posible afirmar que la cantidad de RSU en la ciudad de Bogotá es suficiente para que cualquiera de las alternativas funcione adecuadamente, no obstante se considera preferente la incineración (72%), la digestión anaeróbica, la gasificación y la pirolisis tienen preferencias similares debido a que aunque las capacidades del sistema son más reducidos en comparación, la generación de residuos en la ciudad podrá sustentar el funcionamiento del sistema.

En el Gráfico 16, se consolida la información referente al criterio de Dimensión Ambiental correspondiente al más significativo a la hora de tomar una decisión, en relación con las emisiones atmosféricas y la producción de gases efecto invernadero resultan altamente preferentes las alternativas de gasificación (39%) y pirolisis (39%), son procesos cerrados que no generan emisiones al aire y solamente cuando se utiliza el gas como medio de producción de energía mediante un proceso de combustión las emisiones son controladas con sistemas de lavado y filtrado de gases, estos sistemas al ser procesos en ausencia de oxígeno, logran limitar la producción de subproductos peligrosos como dioxinas y furanos. Por su parte la incineración y la digestión anaeróbica resultan ser las alternativas menos preferentes en consideración de las emisiones atmosféricas, entre sus salidas a la atmósfera se incluye, polvos y gases, como el ácido clorhídrico (HCl), el ácido fluorhídrico (HF) y el dióxido de azufre (SO₂), ciertos compuestos que contienen mercurio, dioxinas o dióxido de nitrógeno (NO₂), para el caso de la incineración y para el de la digestión anaeróbica se produce nitrógeno (N), gases de amoníaco (CH₃) y óxido nítrico (NO) y también se pueden producir N₂O y CH₄.

Gráfico 16. Priorización de alternativas en consideración de los subcriterios asociados al criterio Dimensión Ambiental



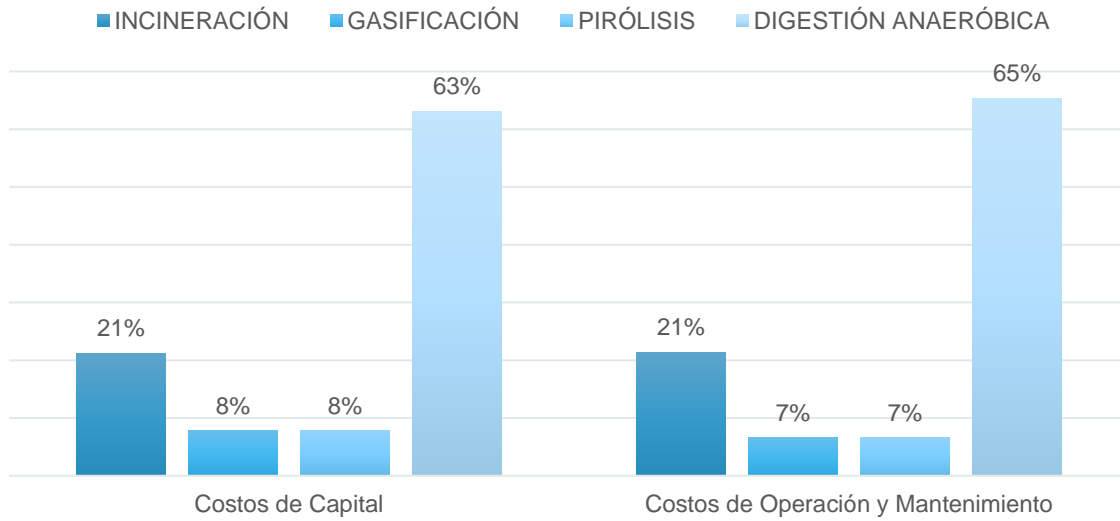
Fuente: Elaboración propia (2020)

Con relación al subcriterio residuos sólidos producto del proceso resultan preferentes las alternativas de gasificación (39%) y pirolisis (39%) considerando que una vez son implementadas se generan cenizas, escoria y metales, sin embargo tales residuos no revisten de potencial peligrosidad, en el orden de preferencia le sigue la alternativa de incineración (17%) que produce cenizas de fondo y volantes las cuales de acuerdo a sus condiciones serán manejadas como residuos peligrosos y finalmente la digestión anaeróbica (5%) que produce digestato.

En referencia al subcriterio de residuos potencialmente reutilizables es preferente la alternativa de pirolisis (47%) ya que sus residuos pueden ser integrados al sistema en la producción de concreto y asfalto, sigue la gasificación (34%) debido a que la ceniza resultante puede ser usada como abono, material de construcción o en fabricación de vidrio, posteriormente se preferiría la digestión anaeróbica (11%) pues el digestato podrá usarse contribuyendo a la mejora de fertilidad de los suelos.

Por su parte el Gráfico 17, contiene la priorización de alternativas contemplada en referencia al criterio Dimensión económica en consideración de los subcriterios de costos de capital y costos de operación y mantenimiento, esta gráfica se elabora vinculando los datos consolidados en la Tabla 35.

Gráfico 17. Priorización de alternativas en consideración de los subcriterios asociados al criterio Dimensión Económica



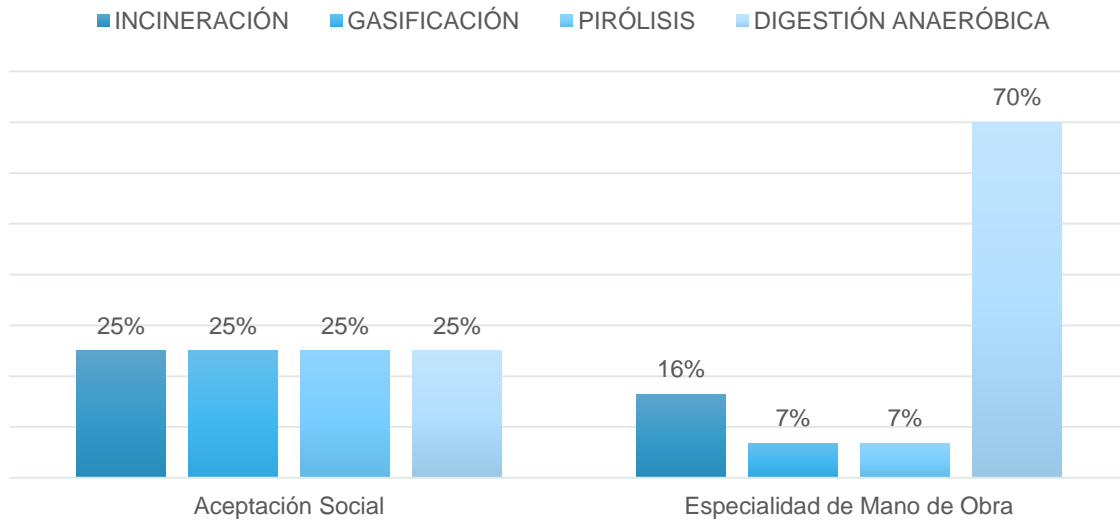
Fuente: Elaboración propia (2020)

Con relación al criterio de Dimensión económica resulta posible evidenciar que la preferencia está dada en dirección a alternativa menos costosa tanto en la inversión inicial como en el gasto correspondiente a la operación y mantenimiento de esta, es así como, en consideración del subcriterio costo de capital resulta preferente la digestión anaeróbica (63%), seguida por la incineración (21%) y finalmente están la gasificación y pirólisis (8%).

En referencia al subcriterio de costos de operación y mantenimiento el resultado es similar siendo más preferente la digestión anaeróbica (65%), seguida por la incineración (21%) y finalmente están la gasificación (7%) y la pirólisis (7%).

Al considerar el criterio de Dimensión Social se obtiene lo referido en el Gráfico 18, que se elabora vinculando los datos presentados en la Tabla 35.

Gráfico 18. Priorización de alternativas en consideración de los subcriterios asociados al criterio Dimensión Social



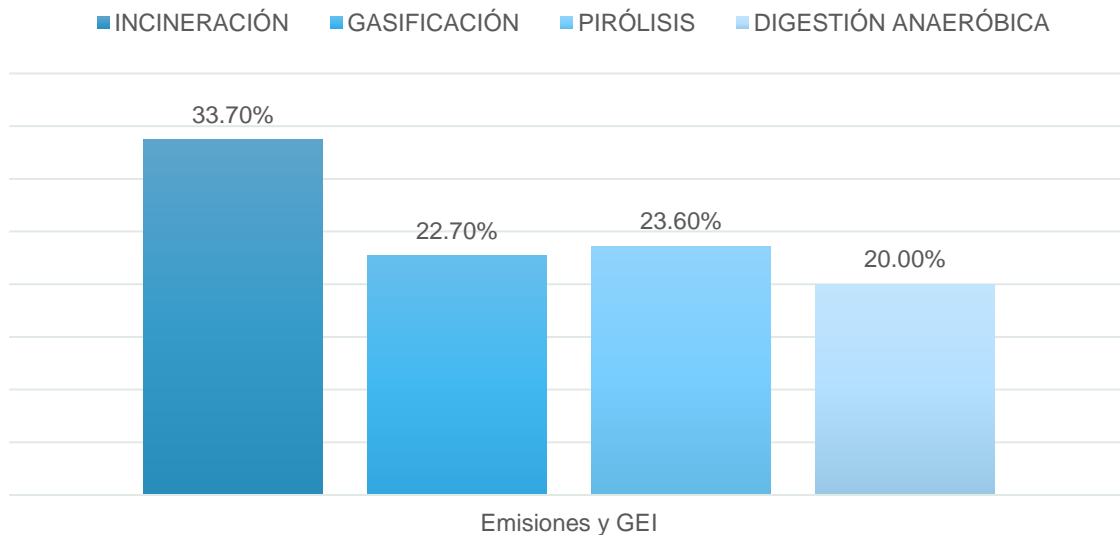
Fuente: Elaboración propia (2020)

Respecto al subcriterio de aceptación social se observa una condición en la que este contribuye a todas las alternativas bajo el mismo nivel de importancia contemplando que con la implementación de cualquiera de estas alternativa y con la evidencia de mejorar la gestión de RSU en la ciudad la aceptación de cualquiera de las alternativas por parte de la sociedad sería positiva. En relación con el subcriterio de especialidad de mano de obra la preferencia se establece teniendo en cuenta la disponibilidad de mano de obra especializada en la ciudad resultando preferente aquella alternativa que requiere menor cantidad de mano de obra especializada siendo en este caso la digestión anaeróbica (70%), seguida por la incineración (16%) y finalmente la gasificación (7%) y la pirólisis (7%) al ser las que mayor desarrollo tecnológico refieren.

4.4.5. Selección de alternativa

Con el procedimiento previamente realizado resultara entonces posible establecer la alternativa teórica de valorización energética para los RSU de la ciudad de Bogotá basada en un proceso de análisis jerárquico que tuvo en cuenta aspectos técnicos, ambientales, económicos y sociales. El Gráfico 19, consolida los resultados del análisis jerárquico multicriterio realizado por medio de la herramienta online AHP Online System – AHP. OS, durante los meses de septiembre - noviembre de 2020

Gráfico 19. Priorización de alternativas en consideración de los subcriterios asociados al criterio Dimensión Social

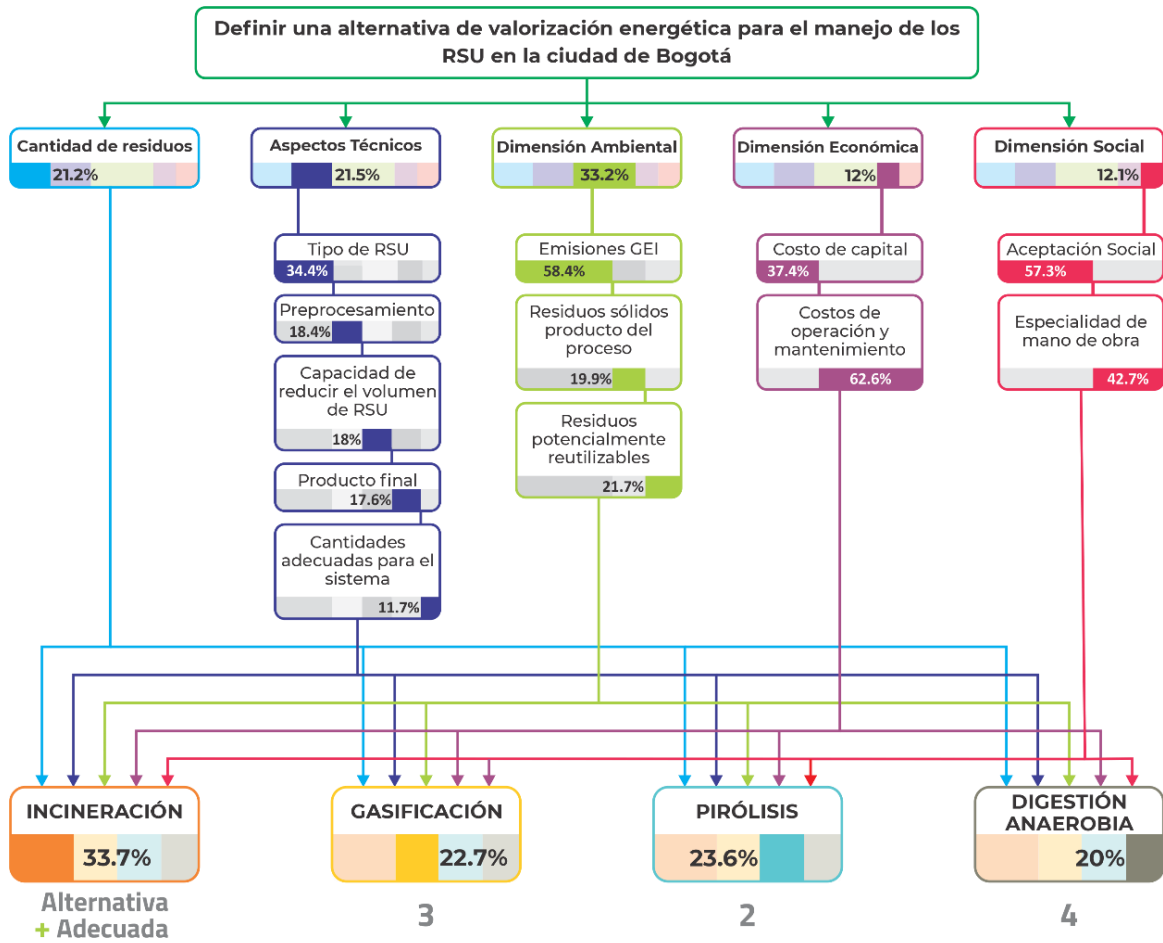


Fuente: Elaboración propia (2020)

En el Gráfico 19, se observa que el mayor peso de preferencia es obtenido por la alternativa de incineración (33,7%), seguido por la alternativa de pirolisis (22,7%), posteriormente es preferente la alternativa de gasificación (23,6%) y finalmente es considerada la alternativa de digestión anaeróbica (20%).

El diagrama que se presenta a continuación se elabora con base en el planteado previamente (Diagrama 13. Esquema Jerárquico para la toma de decisión) en donde se presentó el objetivo, los criterios y subcriterios que contemplan las dimensiones relevantes para lograr un escenario de sostenibilidad en la toma de decisión y las alternativas a considerar como posibilidades para lograr la meta, ofreciendo una visión desglosada del problema en un esquema jerárquico, tal esquema se complementó incluyendo los resultados obtenidos en análisis jerárquico multicriterio que se encuentran previamente referidos en la Tabla 34. Priorización de criterios considerados para la toma de decisión y en la Tabla 35. Matriz de priorización de alternativas en consideración de los criterios y subcriterios vinculados en la toma de decisión, esta información se configura en la que soporta el resultado frente a la toma de decisión con respecto a una alternativa de valorización energética para el manejo de los RSU en la ciudad de Bogotá, y bajo el Diagrama 14 se presenta a continuación, resulta posible evidenciarla de manera esquemática.

Diagrama 14. Esquema Jerárquico con resultados de AHP para la toma de decisión



Fuente: Elaboración propia con base resultados obtenidos en Goepel, K.D. (2018a)

En el Diagrama 14 es posible observar a través del esquema jerárquico el resultado generado en la investigación, en este se vinculan los pesos ponderados que por medio de la emisión de los juicios de valor del panel de expertos se obtuvieron y conllevaron a la selección de una alternativa teórica de valorización energética de RSU para la ciudad de Bogotá. En el Diagrama 14 se refieren los criterios incluidos en el análisis multicriterio que tuvo como meta seleccionar una alternativa de valorización energética para el manejo de RSU en la ciudad de Bogotá, entre cuatro distintas posibilidades; incineración, gasificación, pirólisis y digestión anaeróbica, al ser estas las alternativas comúnmente utilizadas para la gestión de residuos sólidos en el mundo. Los criterios y subcriterios considerados en el análisis fueron enmarcados en el escenario del desarrollo sostenible razón por la cual se vincularon temas ambientales, sociales y económicos, así como también aspectos técnicos y un criterio específico asociado a la cantidad de residuos

valorizables energéticamente disponibles para la implementación de este tipo de alternativas.

Se observa además como resultado que el peso ponderado más significativo de los criterios incluidos está dado por la dimensión ambiental (33%), seguido por los aspectos técnicos (22%), la cantidad de residuos (21%), y las dimensiones social y económica con importancias iguales (12%), lo anterior refleja que existe una altísima preocupación por parte de los expertos consultados en relación con los temas ambientales que pudiesen involucrarse en la implementación de una alternativa de valorización energética, razón por la cual se deberá prestar especial atención a sus sistemas de lavado de gases y al manejo de residuos resultantes de su propia operación. En relación con los aspectos técnicos la puesta en marcha de la alternativa deberá enfocar sus esfuerzos asegurándose de; reducir el volumen de disposición final de RSU, contar con el tipo de RSU necesarios para su funcionamiento y abordar las acciones de preprocesamiento necesarias. Con respecto a la cantidad de RSU es necesario considerar la disponibilidad de estos al ser este un elemento fundamental para establecer el potencial de generación energética. En referencia a los aspectos sociales resultará primordial hacer un manejo adecuado de las expectativas sociales por medio de sensibilización, así como también considerar la vinculación de mano de obra local que logre alcanzar altos niveles de especialidad y finalmente con respecto a los temas económicos resultará importante evaluar la disponibilidad de capital para su operación en el tiempo, así como también el existente para su instalación

Adicionalmente, se establece que con la implementación de un modelo de análisis jerárquico multicriterio que buscó establecer una alternativa teórica de valorización energética de RSU para la ciudad de Bogotá, se determinó como preferente la incineración (33,7%), seguida por las alternativas de pirolisis (23,6%) y gasificación (22,7%) obteniendo pesos de importancia similares y finalmente es considerada la alternativa de digestión anaeróbica (20%).

CAPITULO 5 - PROPUESTA

Los resultados presentados en el capítulo anterior permiten referir que existen tecnologías de valorización energética de residuos sólidos urbanos que contribuyen al manejo integral de los mismos aportando con su reincorporación en los sistemas productivos gracias a su transformación energética, la implementación de un modelo de análisis jerárquico multicriterio que buscó establecer una alternativa teórica de valorización energética de RSU para la ciudad de Bogotá, evidenció como preferente la incineración (30,2%), seguida por las alternativas de pirólisis (24,10%) y gasificación (23%) obteniendo pesos de importancia similares y finalmente es considerada la alternativa de digestión anaeróbica (22,6%).

Por lo tanto, al considerar los resultados obtenidos en esta investigación se propone vincular en el marco de la gestión integral de residuos sólidos de la ciudad de Bogotá la posibilidad de implementar la incineración de RSU como una tecnología de valorización energética que complementaría un esquema enmarcado en el manejo de los residuos bajo la jerarquía de gestión integral de residuos contribuyendo de esta forma enfrentar uno de los principales desafíos presentes en la ciudad. Bajo este escenario en la Tabla 36 se ofrece de manera simplificada el panorama de la implementación de un proceso de incineración de RSU para la ciudad de Bogotá, teniendo en cuenta la cantidad de RSU generados en la ciudad, los aspectos técnicos, y las dimensiones ambiental, social y económica, temas que correspondieron a los criterios evaluados para cada alternativa considerada en el modelo de análisis jerárquico.

Tabla 36. Consideraciones técnicas, ambientales, sociales y económicas para la implementación de la incineración de RSU en la ciudad de Bogotá

ASPECTOS TÉCNICOS	
<p>Tipo de RSU</p> <p>Residuos altamente combustibles, papel, trozos de madera, trapos, cartones, incluidos hasta un 10% de papeles tratados, desechos de plástico o caucho; fuentes comerciales e industriales (Brunner, 2002).</p>	<p>Actualmente, aunque en la ciudad de Bogotá se incrementan constantemente los esfuerzos por hacer una adecuada separación en la fuente, muchas veces estos se ven anulados en el proceso de recolección al resultar mezclados, cuando tales escenarios ocurren la tecnología de incineración tendrá indistintamente la capacidad de gestionarlos, pues su sistema permite el manejo de cualquier RSU.</p> <p>La producción de residuos sólidos urbanos valorizables energéticamente incluye los residuos clasificados bajo las categorías de, materia orgánica, textil, papel y cartón en la ciudad de Bogotá corresponde a un promedio de 1.893.886 toneladas anuales y todos estos resultan aptos para su inclusión en un proceso de incineración</p>
<p>Preprocesamiento</p> <p>Se debe hacer una separación para extraer los residuos potencialmente reciclables.</p>	<p>Utilizando la tecnología de incineración en la gestión de los RSU resultaría posible pasar de disponer un promedio anual de 2.540.251 toneladas a 508.050 toneladas en el año, que corresponderían a 1.392 toneladas en el día.</p>
<p>Capacidad de reducir el volumen de RSU</p> <p>80%</p>	<p>Con la incineración en la ciudad de Bogotá de un promedio de 1.891.486 toneladas anuales de residuos valorizables con un contenido de energía promedio de 413 GW/Ton/año, resultaría posible obtener alrededor de 99 GW /Ton/año, en forma de energía, considerando el rendimiento global que según (Castells, 2005), citado por (Sanchez, J, 2012, pág. 13) está entre el 20% y 24% de la energía total que entra al sistema.</p> <p>Lo anterior correspondería a generar energía para 780 hogares mensualmente en la ciudad de Bogotá teniendo en cuenta <i>“un consumo energético promedio mensual por hogar en Bogotá para los estratos (1,2,3) de 176 kW (UNAL, 2006)”</i> (Sanchez, J, 2012, pág. 43)</p>
<p>Producto final</p> <p>Calor o Energía</p>	<p>La producción de RSU valorizables energéticamente en Bogotá es en promedio de 5.261 toneladas día, de manera que el sistema funcionaria adecuadamente.</p>
<p>Cantidades adecuadas para el sistema</p> <p>Más 450 t/día</p>	<p>La producción de RSU valorizables energéticamente en Bogotá es en promedio de 5.261 toneladas día, de manera que el sistema funcionaria adecuadamente.</p>

DIMENSIÓN AMBIENTAL

Emisiones atmosféricas

Polvos y gases, como el ácido clorhídrico (HCl), el ácido fluorhídrico (HF) y el dióxido de azufre (SO₂).
Ciertos compuestos que contienen mercurio, dioxinas o dióxido de nitrógeno (NO₂)

El 20% de las emisiones de gas metano (CH₄) y otros gases tóxicos a nivel mundial son producidos por los rellenos sanitarios (Molano Camargo, 2019) y el relleno sanitario Doña Juana no es la excepción. Actualmente el metano producido en el relleno es aprovechado como biogás que produce en promedio 16.65 mWh (UAESP, 2020b), además los sistemas de recuperación de gas de relleno sanitario cuentan con una eficiencia de recuperación del 75% (EPA, 2020) si se tiene un cubrimiento del 100% del área.

Gases efecto invernadero

La incineración ayuda a reducir las emisiones de GEI de dos maneras: (1) eliminando las emisiones de gas metano de los rellenos sanitarios cuando se utiliza como alternativa (Liu, Nishiyama, Kawamoto, & Sasaki, 2020, pág. 3)

En la incineración no se produce gas metano, pero los demás gases son controlados por filtros para el polvo, Gases ácidos como ácido clorhídrico (HCl) y el dióxido de azufre (SO₂) se hacen reaccionar con un agente alcalino y luego se eliminan y las dioxinas y el mercurio se adsorben en carbón activado en polvo y se eliminan (Liu, Nishiyama, Kawamoto, & Sasaki, 2020). En la incineración no se presentan emisiones fugitivas ya que el proceso está totalmente controlado.

Residuos potencialmente reutilizables

Sí. Cenizas volantes con posibilidad de ser tratadas como agregados para morteros.

Uno de los residuos resultantes del proceso de incineración corresponde a cenizas volantes y cenizas de fondo, que, de acuerdo con Castells, 2005, citado por (Sanchez, J, 2012, pág. 16), en instalaciones de incineración continua representan entre el 20% y 30% respecto al RSU entrante en peso. Por lo tanto, en el caso de Bogotá tal producción de residuo sólido estaría en entre 378.777 y 568.166 toneladas de cenizas que dependiendo de sus características podrán ser reincorporadas al sistema productivo como agregados para morteros o si revisten de condiciones de peligrosidad ser dispuestas de acuerdo con los lineamientos que el manejo de este tipo de residuos conlleva.

Residuos sólidos producto del proceso

Si. Cenizas de fondo y volantes deben ser tratadas como residuos peligrosos.

DIMENSIÓN ECONÓMICA

Costos de Capital 22-55 EUR/t

Los costos de capital requeridos para la implementación de la tecnología de incineración en la ciudad de Bogotá suponiendo el manejo de un promedio de 1.891.486 toneladas anuales de residuos valorizables, estarían entre \$41.612.692.00 EUR y \$104.031.730.00 EUR.

Costos de Operación y Mantenimiento 20-35 EUR/t

Los costos de operación y mantenimiento de la tecnología de incineración en la ciudad de Bogotá suponiendo el manejo de un promedio de 1.891.486 toneladas anuales de residuos valorizables, estarían entre \$37.829.720.00 EUR y \$66.202.010 EUR.

DIMENSIÓN SOCIAL

Aceptación social

La efectividad de la implementación de un proceso de gestión de residuos es altamente dependiente de la aceptación de la comunidad local y esto es especialmente complejo cuando no existen experiencias previas conocidas, sin embargo, es conocido que la actitud de las poblaciones respecto a las alternativas de valorización energética cambia cuando evidencian el problema de manejo actual y lo comparan con la alternativa.

(Achillas, Ch., Vlachokostas, Ch. Moussiopoulos, N., Baniyas, G y Karagiannidis, A., 2011, pág. 862)

La puesta en marcha de la incineración de RSU en Bogotá necesariamente deberá estar acompañada de un proceso de sensibilización con los diferentes actores interesados en el proceso, incluyendo tanto a comunidad en general como a gobierno, instituciones, trabajadores relacionados con la cadena del manejo de residuos, organizaciones no gubernamentales, etc., en dicho proceso de deberán resaltar las virtudes de la implementación de un sistema de este tipo como soporte a la gestión de residuos de la ciudad y además referir las afectaciones que podría causar con los correspondientes manejos que se deberían implementar para su gestión.

Especialidad de mano de obra

La implementación de cualquier alternativa de valorización energética requiere de personal especializado y que desarrolle capacidades para este tipo de proyectos, esto resulta necesario tanto para el personal del sector público en su rol de regulador y/o ejecutor y para el personal del sector privado como ejecutor. Por lo tanto, el reclutamiento de personal calificado local resulta complejo.

(Castells X. E., 2005, pág. 52)

La vinculación de la incineración de RSU en el sistema de gestión integral de residuos sólidos de la ciudad de Bogotá, necesariamente requerirá de mano de obra experta y especializada en el tema que en fases iniciales probablemente no se ubicará con facilidad en el país, sin embargo bajo el marco de este proceso resulta pertinente inicialmente entrenar personal del sector público que ejerce como regulador en el tema y segundo vincular personal local que a través de un rol activo en el proceso pueda adquirir la experticia necesaria.

Considerando lo planteado en la Tabla 36, con la puesta en marcha de la incineración como componente de tratamiento de los RSU en el esquema de servicio público de aseo de Bogotá será posible; reducir la disposición diaria de residuos en el relleno sanitario Doña Juana a 1.295 toneladas en el día, disminuir la producción de gases efecto invernadero que hoy se expulsan en el relleno, generar energía para aproximadamente 780 hogares de la ciudad de los estratos 1, 2 y 3; y contribuir con el logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 7 y 11, además de la Estrategia Nacional de Economía Circular que hacen parte de las acciones del gobierno para cumplir con las metas de la Agenda 2030.

Sumado a lo presentado en la Tabla 36, se plantean algunas perspectivas adicionales que soportarían la puesta en marcha de la tecnología de incineración y que se considera fortalecen la posibilidad de implementarlo en la ciudad de Bogotá.

5.1. Impacto social - Empleo

Según un reporte de la Superintendencia de Servicios Públicos del 2017, el relleno sanitario Doña Juana, operado por el Centro de Gerenciamiento de Residuos Doña Juana S.A. E.S.P. empleó aproximadamente 229 personas en el 2016 (Superservicios, 2017) distribuidos como muestra la Tabla 37.

Tabla 37. Personal empleado CGRDJ 2016

Área	Cantidad
Almacén	4
Compras	1
Contabilidad	1
Dirección ejecutiva	2
Dirección Financiera	3
Dirección Técnica y Operativa	4
Estabilización Dique 6 Zona 7	3
Estudios y diseños	4
Frente de disposición	61
Gestión Ambiental	29
Gestión SISO	4
Gestión Social	6
Jurídica	1
Laboratorio PTL	4
Monitoreo y control geotécnico	4
Obras Civiles	32
Planta de tratamiento	20
Programación Presupuesto y seguimiento	1
Serv. Aprovechamiento	13
Servicios administrativos	9
Sistema de gestión HSEQ	1
Talento Humano	3
Taller de maquinaria	16
Tecnología y gestión de datos	1
Tesorería	2
TOTAL	229

Fuente: Superservicios (2017)

El mayor número de personas trabajan en el frente de disposición, seguido por las obras civiles y luego por la gestión ambiental.

El Banco Mundial estima que una planta de incineración puede llegar a emplear de 50 a 200 personas, dependiendo el tamaño de planta (Rand, Haukohl, & Marxen, 2000) y entrega algunos datos de requerimiento de personal y las áreas que deben ser atendidas por estos y que se muestran en la Tabla 38.

Tabla 38. Requerimiento estimado de personas para operar una planta de incineración

Área	Cantidad
Dirección técnica y financiera	3
Contabilidad y finanzas	6
Operadores de planta	>14
Operadores de grúa	>7
Supervisores de turno (HSE, ambiental)	>7
Mecánicos	>5
Electricistas	>2
Servicios generales	30
TOTAL	>74

Fuente: Rand, Haukohl, & Marxen (2000)

La demanda de personal para la operación del relleno sanitario, frente a la operación de una planta de incineración, depende mucho del tamaño y tipo de manejo de la planta (turnos 24/7), es por esto por lo que, según la información presentada por Rand, Haukohl, & Marxen (2000) y la Superservicios (2017), sí se puede resentir el empleo al inicio de la operación. Otro punto para tener en cuenta es que las plantas de incineración requieren trabajadores mejor calificados y mano de obra especializada, lo que abre la puerta a programas de formación técnica y al mejoramiento de la calidad de vida del personal.

Otro dato interesante es presentado por Hall & Nguyen (2012) mostrado en la Tabla 39, donde un análisis realizado en Francia, se calculó que la operación de plantas de incineración emplea más personas que los rellenos sanitarios y que el sector privado es el que más invierte en esta tecnología empleando a mayor cantidad de personal.

Tabla 39. Empleo en los segmentos de relleno sanitario e incineración Francia 2009

	Trabajos (fte⁷) por 1000 tons	Total, de puestos de trabajo privados en Francia en el 2009	Porcentaje privado	Total, de puestos de trabajo
Incineración	0.3	3709	93%	3988
Relleno Sanitario	0.1	1778	90%	1976

Fuente: Adaptado de Hall & Nguyen (2012)

5.2. Apoyo y experiencia internacional

Existen tecnologías de valorización energética de RSU que contribuyen al manejo integral de los mismos aportando con su reincorporación en los sistemas productivos gracias a su transformación energética, esto contribuye a enfrentar las dificultades que ciudades como Bogotá encaran al tener que gestionar volúmenes cada vez mayores de RSU, de hecho organismos internacionales como; Environment Protection Authority South Australia (EPA South Australia), Food and Agriculture Organization (FAO), The International Solid Waste Association (ISWA), Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ), United Nation Environment Program (UNEP), han generado documentos guía que ofrecen lineamientos y recomendaciones para la implementación de alternativas de valorización energética en países en vía de desarrollo, basados en la experiencia ya consolidada de los países desarrollados. Con base en estas experiencias y estudios, algunos utilizados en esta investigación, Bogotá tiene la oportunidad de usarlos como insumo en procesos de toma de decisiones en cuanto al uso de estas tecnologías que están maduras en otros países del mundo como Japón, China y Estados Unidos.

5.3. Garantía de suministro de RSU valorizable energéticamente

De acuerdo con la proyección de generación de RSU realizada para la ciudad de Bogotá entre 2005 y 2030 el incremento promedio anual será de 1,3% alcanzando en 2030 una generación estimada de 2.756.327 toneladas, ahora bien, se observa además que entre los años 2019 y 2030 el contenido promedio de los RSU valorizables energéticamente sería de 1.891.486 toneladas anuales y que su contenido de energía promedio estimado de acuerdo con los resultados obtenidos previamente sería de 413 GW/Ton/año. Así, Bogotá tiene el potencial energético en los RSU para implementar la tecnología de incineración como parte de su esquema de aseo y comenzar a pensar en el

⁷ Full-time equivalent (equivalente a tiempo completo)

cierre del relleno sanitario Doña Juana, o usar como complemento para recibir la fracción sólida resultante del proceso la cual es considerablemente menor a los residuos que recibe hoy y que recibirá en los próximos años.

5.4. Valorización energética de residuos como parte de la economía circular

La posibilidad de implementar un sistema de incineración de RSU solamente puede estar enmarcada en un esquema que integre de manera sistémica la gestión residuos y que se soporte en el desarrollo de un política local de valorización energética de RSU vinculada con un modelo económico circular en donde se recuperen los residuos de manera innovadora tal como lo contempla el mismo Departamento Nacional de Planeación en su Estrategia Nacional de Economía Circular, en donde referencia como vehículo impulsor del desarrollo la existencia de ciudades sostenibles debido a que es allí el lugar en donde se integran los ciclos productivos (se transporta, transforma y entrega materiales para el consumo, se utiliza el agua y la energía y se establece la forma en que se gestionan los residuos sólidos y líquidos), conllevando entonces a que en la medida en que se originen transformaciones relativas al cambio de cultura, a través sistemas comerciales e industriales eficientes, recolección selectiva de residuos, impuestos a la disposición final de basuras en rellenos sanitarios, diseño de sistemas colectivos de transporte y aprovechamiento de agua residual tratada, en los modelos de ciudad resultará más viable la economía circular (DNP-Departamento Nacional de Planeación, 2019, pág. 23)

A continuación se presenta el Diagrama 15, retomado de la Estrategia Nacional de Economía Circular (DNP-Departamento Nacional de Planeación, 2019) que a su vez es adaptada de la OCDE y que refiere los cambios e innovaciones que deberían contemplarse para alcanzar un modelo económico circular, estas transformaciones van desde la valoración de residuos, el cierre de ciclos de los materiales, el alargamiento de la vida útil de los insumos y productos, el cambio de productos por servicios, y la gestión de datos por medio de herramientas digitales que den cabida a la optimización de materiales. De tal manera en el diagrama es posible observar cinco tipos de iniciativas que corresponden a; modelos de valorización de residuos, modelos circulares, modelos de extender la vida útil, modelos de productos como servicios y modelos de plataforma; que

en sí mismos se configuran en modelos de negocio con cadenas de valor diferentes. (DNP-Departamento Nacional de Planeación, 2019, pág. 20)

Diagrama 15. Tipologías de iniciativas innovadoras de la economía circular



Fuente: DNP-Departamento Nacional de Planeación (2019, pág. 22)

En el Diagrama 15, resalta dentro de las tipologías de iniciativas innovadoras que buscan estimular la transición de una economía lineal a una economía circular, el modelo de valorización de residuos en el cual utilizan como ejemplo el aprovechamiento energético de estos, para mantener dentro del ciclo productivo los componentes que son útiles para otras industrias, así la energía producida por el proceso de incineración de residuos propuesto, alimentará diferentes procesos productivos, convirtiendo al aprovechamiento energético de residuos en protagonista dentro del cambio de paradigma lineal al circular. Es así que propuestas encaminadas a la valorización energética de RSU encajan adecuadamente como modelo de negocio adecuado para hacer parte de un modelo económico circular logrando que los residuos generados en la ciudad sean utilizados en aplicaciones diferentes, recirculándolos en el sistema productivo al ser vinculados como energía gracias a su transformación, sumado a que, además propenderá por minimizar el uso de recursos naturales no renovables que actualmente son explotados para suplir las necesidades energéticas del modelo económico lineal.

5.5. Incentivos tributarios

La energía proveniente de residuos sólidos que no son susceptibles de aprovechamiento está catalogada una FNCER en el artículo 18 de la ley 1715 de 2014 (Congreso de Colombia, 2014), adicional a esto, la UPME ha desarrollado la guía práctica

para la aplicación de los incentivos tributarios de la Ley 1715 de 20114 (MINMINAS, 2016) que explica de forma clara como aplicar estos beneficios a los proyectos:

1. Deducción especial sobre el impuesto sobre la renta: Quien realice erogaciones en investigación, desarrollo o inversiones en FNCER podrán deducir de su impuesto de renta hasta el 50% del valor de la inversión. Este no puede ser mayor al 50% de la renta del contribuyente.
2. Depreciación acelerada: En proporción al valor al activo no superior al 20%
3. Exclusión de IVA: Al adquirir equipos destinados a la construcción de la planta están exentos del IVA.
4. Exención de gravámenes arancelarios: Las máquinas, equipos, materiales e insumos importados para la construcción de la planta están exentos de pagar derechos arancelarios.

Así pues, el aprovechamiento energético de residuos como modelo de valoración dentro de las tipologías de iniciativas innovadoras de la economía circular (ver Diagrama 15), abre la puerta a la inversión privada o a alianzas público-privadas (APP) para el desarrollo de proyectos de este tipo que propendan por una gestión sostenible de los RSU y hacer uso de los incentivos tributarios anteriormente nombrados, lo que hace atractivo que grandes capitales se interesen en desarrollar este tipo de proyectos en la ciudad.

CAPITULO 6 – CONCLUSIONES

La generación de RSU en la ciudad de Bogotá está directamente relacionada con la cantidad de población que habita la ciudad, en el censo poblacional más reciente realizado en 2018 correspondió a 7.412.566 habitantes y se proyecta que en 2050 ascienda a 9.164.455, en la medida en que esta aumente los residuos lo harán de manera proporcional, de acuerdo con el análisis realizado se estima que hasta el año 2030 anualmente la generación de residuos se incrementará en promedio 1,3% y que la generación per-cápita de residuos anual estará alrededor de 305 Kg.

Con base en la caracterización de los RSU se encuentra que entre los años 2019 y 2030 el promedio de los RSU valorizables energéticamente, que incluye los residuos clasificados bajo las categorías de, materia orgánica, textil, papel y cartón, es de 1.891.486 Kg anuales y que su contenido de energía será en promedio de 413 GW/Ton/año.

Por medio de la implementación del análisis jerárquico multicriterio es posible soportar la toma de decisiones complejas en consideración de las diferentes aristas que deben ser tenidas en cuenta al solucionar un problema, en el caso de esta investigación fue utilizado para determinar una alternativa teórica de valorización energética de RSU para la ciudad de Bogotá en un marco que consideró aspectos relativos a temas técnicos, económicos, ambientales y sociales para así basar la toma de decisión en un contexto de sostenibilidad, así las cosas el resultado de esta investigación y el proceso llevado a cabo para llegar al mismo puede considerarse como una herramienta funcional y replicable en otras ciudades o municipios del país interesados en propender por una gestión más sostenible de sus residuos sólidos.

El resultado del análisis jerárquico da a la incineración una preferencia de 33,7%, sobrepasando a la pirolisis con 23,6%, seguida por la gasificación con 22,7% y finalmente la digestión anaeróbica con 20%, estos resultados convierten a la incineración en la alternativa para tener en cuenta en el momento de implementar un sistema de generación de energía a través de residuos sólidos. Teniendo en cuenta que, en el análisis, la dimensión ambiental es la prioridad más importante para los expertos consultados obteniendo un peso de 33%, la incineración no es la alternativa más fuerte en este aspecto ya que produce mayor cantidad de GEI (14% en relación con criterio de Emisiones y GEI), y genera subproductos valorizables limitados en comparación con las demás (11% en relación con criterio de Residuos potencialmente reutilizables), como si lo

hacen las demás tecnologías. En esta dimensión la que cuenta con mayor preferencia son la pirolisis y la gasificación por emitir menos GEI, los residuos sólidos producidos en el proceso son mínimos y genera subproductos que tienen valor.

En cuanto al aspecto técnico que tiene una ponderación de importancia del 22%, de los cinco subcriterios que lo componen, solo en dos la incineración es superada corresponde al producto final (16%) y capacidad de reducir el volumen de RSU (16%), porque esta tecnología solo produce el calor, y las demás producen un gas combustible y subproductos valorizables como la brea, las cenizas o el digestato que se pueden usar como agregado para cemento o fertilizantes. Los demás subcriterios técnicos como el tipo de RSU y el pretratamiento son sobrepasados contundentemente, al referir pesos ponderados que superan el 60% frente a las demás alternativas, por la capacidad de procesar todo tipo de residuo y sin necesitar un pretratamiento exhaustivo, por estas razones la incineración se adapta mejor a las condiciones de los residuos de la ciudad.

En términos económicos, las tecnologías que requieren mayor infraestructura, elementos de control de emisiones o sistemas de pretratamiento son las que requieren mayor inversión y mayores costos de operación como la gasificación, la pirolisis y la incineración, aunque dentro de las tecnologías que utilizan procesos termoquímicos de valorización energética de residuos esta última es la más asequible. Dentro de este conjunto de tecnologías, la digestión anaeróbica es la que menos costos de capital y costos de operación y mantenimiento requiere, con un porcentaje de 63% y 65% de preferencia respectivamente, esto dado por el tipo de equipamiento que necesita, esta tecnología solo emplea residuos orgánicos en su proceso y sus reacciones suceden de forma natural por la biodegradación de la materia orgánica.

La incineración a pesar de sus diferencias con tecnologías como la gasificación y la pirolisis, en cuanto a generación de productos aprovechables y emisiones de GEI es por mucho la más relevante dada su capacidad de recibir residuos mezclados de todo tipo, condición que para países en vías de desarrollo y ciudades como Bogotá resulta ventajoso al momento de operar el sistema, por la tanto los costos de mantenimiento y operación se mantendrían bajos.

No hay normatividad específica sobre la valorización energética de RSU, únicamente se pueden identificar las relacionadas con los impactos que la tecnología genera, especialmente en cuanto a la generación de emisiones, gestión de residuos sólidos y residuos peligrosos. Desde el año 2008 en el documento CONPES 3530 comienza a incluir el uso de residuos como posible fuente de generación de energía,

luego en el 2016 el CONPES 3874 dice explícitamente la necesidad de desarrollar instrumentos para promover el tratamiento de residuos sólidos con fines de valorización como la generación de energía eléctrica, esto en el marco de la promoción de la economía circular, lo que invita al gobierno nacional legislar en esta dirección. Cabe aclarar que se viene adelantando iniciativas importantes para las FNCER que estimulan la inversión en estas tecnologías al dar incentivos tributarios a quienes las implementen.

Para finalizar, la valoración energética de residuos sería un jugador importante tanto en la mejora de gestión de los residuos para la ciudad de Bogotá contribuyendo a disminuir la disposición de residuos sólidos en el Relleno Sanitario actual en un porcentaje cercano al 25%, como también en el cumplimiento de los ODS en especial en los objetivos 7, energía asequible y no contaminante, y el 11, ciudades y comunidades sostenibles. En cuanto al objetivo 7 en su meta 2 busca que se aumente considerablemente la proporción fuentes de energía renovables, en este caso, al usar los residuos como combustible, se reemplazaría el uso de una fracción de fuentes convencionales alimentadas por combustibles fósiles. Para el ODS 11, en la meta 6 *“propone que de aquí a 2030 se reduzca el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, prestando especial atención a la calidad del aire y la gestión de los desechos municipales y de otro tipo”* (Naciones Unidas, 2020). Con esto en mente, la incineración de residuos se convierte en la alternativa para la gestión y valorización de residuos en la ciudad de Bogotá.

CAPITULO 7– RECOMENDACIONES

La investigación que acá se desarrolla corresponde a una primera aproximación que vincula el uso de una herramienta de análisis jerárquico multicriterio para la toma de decisiones sobre la gestión de residuos sólidos urbanos en la ciudad de Bogotá, pone sobre la mesa la posibilidad de complementar la gestión de RSU con alternativas de valorización energética y reconoce además que es un tema sujeto a mejoras constantes no solo a la luz de la evolución de las tecnologías, sino también en el marco del desarrollo de estudios e investigaciones que complementen y aporten a mejorar la conveniencia o no de las posibilidades, bajo esta premisa a continuación se refieren algunas recomendaciones que bajo el concepto de los autores podría configurarse en propósitos de investigación que complementen lo acá desarrollado.

1. Durante el año 2020 el país y el mundo entero se enfrenta a la pandemia COVID-19, esta condición puede configurarse en un aspecto que genere cambios sustanciales sobre la generación de RSU en las ciudades, probablemente ocasionando un incremento significativo en los residuos hospitalarios y biológicos, de manera que en investigaciones posteriores se recomienda vincular tal escenario.
2. Las acciones asociadas a la separación en la fuente y reciclaje tienen repercusiones directas sobre la composición y cantidad de los RSU de la ciudad, por lo tanto, es recomendable abordar escenarios en los cuales tales procesos sean considerados específicamente
3. Desde los aspectos sociales a considerar en el análisis jerárquico multicriterio es adecuado en avances posteriores vincular como criterio uno asociado a la cantidad de empleos que posiblemente generaría cada alternativa y otro en el que se vincule los efectos que cada una tendría sobre la población recicladora de oficio al ser considerados actores claves en el proceso de gestión de los residuos
4. Desde los aspectos económicos a considerar en el análisis jerárquico multicriterio, es importante en investigaciones subsiguientes plantear un criterio asociado a la capacidad del sistema actual de la ciudad para pagar o financiar la implementación de una u otra alternativa

REFERENCIAS

- Superintendencia de Servicios Públicos & DNP. (2019). *Informe de Disposición Final de Residuos Sólidos - 2018*. Obtenido de www.superservicios.gov.co:
https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Publicaciones/Publicaciones/2020/Ene/informe_nacional_disposicion_final_2019_1.pdf
- Achillas, Ch., Vlachokostas, Ch. Moussiopoulos, N., Banias, G y Karagiannidis, A. (July-Agust de 2011). Social acceptance for the development of a waste-to-energy plant in an urban area. *Resources, Conservation and Recycling*, 55, 857 - 863.
- Acosta, E. F. (2015). *PANORAMA ACTUAL DE LA SITUACIÓN MUNDIAL, NACIONAL Y DISTRITAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS. ANÁLISIS DEL CASO BOGOTÁ D.C. PROGRAMA BASURA CERO*. Obtenido de
<https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/3417/79911240.pdf;jsessionid=B1C0FFB237F6DED51BE50B30EF9B7E30.jvm1?sequence=1>
- AEVERSU. (2015). *Estudio sobre los impactos socio-económicos y ambientales de la valorización energética de los residuos urbanos en España y Andorra*. Madrid, España.
- Almanaseer, N., Bassim Abbassi, C. D., Friesen, K., & Nestico-Semianiw, E. (2020). Multi-Criteria Analysis of Waste-to-Energy Technologies in Developed and Developing Countries. *Journal of Environmental Research, Engineering and Management*, 32-43. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.5755/j01.arem.76.1.25254>
- AlQattan, N., Acheampong, M., Jaward, F. M., Ertem, F. C., Vijayakumar, N., & Bello, T. (2018). Reviewing the potential of Waste-to-Energy (WTE) technologies for Sustainable Development Goal (SDG) numbers seven and eleven. *Renewable Energy Focus*, 27(00), 97-110. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ref.2018.09.005>
- Arena, U. (2012). Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review. *Waste Management*, 625-639.
- Ávila, R. (2000). *El AHP (Proceso Analítico Jerárquico) y su aplicación para determinar los usos de la tierras. El caso de Brasil*. Informe Técnico No. 2, Santiago de Chile.
- Awasthi, M. K., Sarsaiya, S., Chen, H., Wang, Q., Wang, M., Awasthi, S. K., . . . Zhang, Z. (2019). *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering - Global Status of Waste-to-Energy Technology*. Elsevier.
- Aznar, J. y Guijarro, F. (2012). *Nuevos Métodos de Valoración. Modelos Multicriterio*. (E. U. Valencia, Ed.) Valencia, España.

- Baggio, P., Baratieri, M., Gasparella, A., & Longo, G. A. (2008). Energy and environmental analysis of an innovative system based on municipal solid waste (MSW) pyrolysis and combined cycle. *Applied Thermal Engineering*(28), 136-144.
- Barreto, J. D. (2017). *Doña Juana: 20 años de una tragedia que no se supera*. Obtenido de [www.elespectador.com](https://www.elespectador.com/noticias/bogota/dona-juana-20-anos-de-una-tragedia-que-no-se-supera/): <https://www.elespectador.com/noticias/bogota/dona-juana-20-anos-de-una-tragedia-que-no-se-supera/>
- Becerra, M, y Mance, H. (2009). *Cambio Climático: Lo que esta en juego*. Bogotá, Colombia: Foro Nacional Ambiental.
- Beyene, H. D., Werkneh, A. A., & Ambaye, T. G. (2018). Current updates on waste to energy (WtE) technologies: a review. *Renewable Energy Focus*, 1-11.
- Brunner, C. R. (2002). Chapter 13 - Waste-to-Energy Combustion Incineration technologies. En G. Tchobanoglous, *HANDBOOK OF SOLID WASTE MANAGEMENT* (págs. 13.3 - 13-84). McGraw-Hill.
- Cameron, L., Mozaffarian, H., & Falzon, J. (2014). *Biomass Waste-to-Energy Toolkit for Development Practitioners*. Obtenido de <http://www.ecowrex.org/>: http://www.ecowrex.org/sites/default/files/documents/news/bioenergy_lr.pdf
- Campos, U., Zamenian, H., Koo, D., & Goodman, D. (2015). Waste-to-Energy (WTE) Technology Applications for Municipal Solid Waste (MSW) Treatment in the Urban Environment. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 504-508.
- Caracol. (2018). *Un mal comienzo para los contenedores de basura en Bogotá*. Obtenido de <https://caracol.com.co>: https://caracol.com.co/emisora/2018/11/28/bogota/1543413019_615162.html
- Caracol Radio. (2019). *Van 10,746 contenedores de basura instalados en Bogotá*. Obtenido de <https://caracol.com.co>: https://caracol.com.co/emisora/2019/02/13/bogota/1550017556_926698.html
- Castells, X. E. (2005). *Los residuos como combustibles*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos.
- Castells, X. E. (2005). *Tratamiento y valorización energética de residuos*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos. Obtenido de <https://bdbiblioteca.universidadean.edu.co:2102/lib/bibliotecaeansp/detail.action?docID=3201385>

- CEDEX. (2014). *Cenizas procedentes de la incineración de biomasa*. Obtenido de http://www.cedexmateriales.es/upload/docs/es_CENIZASPROCEDENTESDELA INCINERACIONDEBIOMASADIC2014.pdf
- CGR Doña Juana. (2020). *CGR DOÑA JUANA S.A. E.S.P.- Nosotros*. Obtenido de www.cgr-bogota.com: <https://www.cgr-bogota.com/nosotros>
- Collazos Peñaloza, H. (2011a). *Caracterización de los Residuos Sólidos de Establecimientos Comerciales Pequeños Productores Generados en la Ciudad De Bogotá – 2011*. Obtenido de <http://www.uaesp.gov.co>: http://www.uaesp.gov.co/uaesp_jo/images/documentos/Caracterizacion/comercial_02-29-2012.pdf
- Collazos Peñaloza, H. (2011b). *Caracterización De Los Residuos Sólidos Residenciales Generados En La Ciudad De Bogotá D.C*. Obtenido de http://www.uaesp.gov.co/uaesp_jo/images/documentos/caracterizacion/residenciales_02-29-2012.pdf
- Colorado, y H.; Echeverry, I. (Septiembre de 2020). The solid waste in Colombia analyzed via gross domestic product: Towards a sustainable economy. *Redin*, 51-63.
- Congreso de Colombia. (2014). Ley 1715. Obtenido de <http://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?ruta=Leyes/1687143>
- CONPES 3874. (2016). *POLÍTICA NACIONAL PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS*. Obtenido de <https://colaboracion.dnp.gov.co>: <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3874.pdf>
- CONSORCIO NCU- UAESP. (2018). *Realizar el estudio técnico de la caracterización en la fuente de residuos sólidos generados en la Ciudad de Bogotá Distrito Capital por tipo de generador y establecer el uso de métodos alternativos de transporte para materiales aprovechables*. Obtenido de <http://www.uaesp.gov.co>: http://www.uaesp.gov.co/sites/default/files/Anexo%201.%20Resumen%20ejecutivo%20NCU_0.pdf
- Cristancho, C., & Triana, E. (2018). *Análisis demográfico y proyecciones poblacionales de Bogotá*. Obtenido de www.sdp.gov.co: http://www.sdp.gov.co/sites/default/files/demografia_proyecciones_2017_0.pdf
- Cruz, S., y Ojeda, S. (2013). Gestión sostenible de residuos sólidos urbanos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 29(3), 6-8.

- DANE. (2020). *PROYECCIONES DE POBLACIÓN*. Obtenido de <https://www.dane.gov.co:https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion>
- DANE. (2020). *Retroproyecciones de población con base en el CPNV 2018*. Dirección de censos y demografía , Bogotá.
- DanielButchart-Kuhlmann, Kralisch, S., Fleischer, M., Meinhardt, M., & Brenning, A. (2018). Multicriteria decision analysis framework for hydrological decision support using environmental flow components. *Ecological Indicators*, 93, 470-480. Obtenido de <https://doi-org.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/10.1016/j.ecolind.2018.04.057>
- Ddiba,D., Anderson,K., y Ogol,T. (2018). Urban Circle. Turning urban waste into circulareconomy benefits. *Stockholm Environment Institute*, , 1-4.
- Decreto 1077. (2015). *1077*. Obtenido de <http://www.minvivienda.gov.co:http://www.minvivienda.gov.co/NormativaInstitucional/1077%20-%202015.pdf>
- Decreto 1713. (2002). *Decreto 1713*. Obtenido de www.corponarino.gov.co:https://corponarino.gov.co/expedientes/juridica/2002decreto1713.pdf
- Decreto 1713. (2002). *Por el cual se reglamenta la Ley 142 de 1994, la Ley 632 de 2000 y la Ley 689 de 2001, en relación con la prestación del servicio público de aseo, y el Decreto Ley 2811 de 1974 y la Ley 99 de 1993 en relación con la Gestión Integral de Residuos Sólidos*. Obtenido de www.funcionpublica.gov.co:https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=5542
- Decreto 261. (2010). *Por medio del cual se modifica el Decreto Distrital 620 de 2007 que complementó el Plan Maestro de Residuos Sólidos y se dictan otras disposiciones*. Obtenido de www.alcaldiabogota.gov.co:https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=39986
- Decreto 2981. (2013). *Por el cual se reglamenta la prestación del servicio público de aseo*. Obtenido de www.funcionpublica.gov.co:https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=56035
- Decreto 596. (2016). *"Por el cual se modifica y adiciona el Decreto 1077de 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 dispos.* Obtenido de <https://dapre.presidencia.gov.co:https://dapre.presidencia.gov.co/normativa/normativa/DECRETO%20596%20DEL%2011%20DE%20ABRIL%20DE%202016.pdf>

- Díaz, J. A. (2018). *Advierten que el relleno sanitario Doña Juana llegará a su tope máximo en 2023*. Obtenido de www.uniminutoradio.com.co:
<https://www.uniminutoradio.com.co/advierten-que-el-relleno-sanitario-dona-juana-llegara-a-su-tope-maximo-en-2023/>
- DNP-Departamento Nacional de Planeación. (2019). *Estrategia Nacional de Economía Circular*. (I. y. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Ministerio de Comercio, Ed.) Bogotá, Colombia. Obtenido de
http://www.andi.com.co/Uploads/Estrategia%20Nacional%20de%20EconA%CC%83%C2%B3mia%20Circular-2019%20Final.pdf_637176135049017259.pdf
- El Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea. (2008). *DIRECTIVA 2008/98/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO*. Obtenido de
<https://eur-lex.europa.eu>: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/es/TXT/PDF/?uri=CELEX:02008L0098-20180705&from=EN#:~:text=La%20presente%20Directiva%20establece%20medidas,los%20recursos%20y%20mediante%20la>
- EPA. (2002). *What is Integrated Solid Waste Management?* Obtenido de
<https://nepis.epa.gov>:
<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P1000L3W.txt>
- EPA. (2020). *How does anaerobic digestion work?* Obtenido de <https://www.epa.gov>:
<https://www.epa.gov/agstar/how-does-anaerobic-digestion-work#biogas-handling-system>
- EPA. (2020). *LFG Energy Project Development Handbook*. Obtenido de www.epa.gov:
<https://www.epa.gov/lmop/landfill-gas-energy-project-development-handbook>
- EPA Victoria. (2017). *1559.1 Guideline: Energy from waste*. Obtenido de
www.epa.vic.gov.au: <https://www.epa.vic.gov.au/about-epa/publications/1559-1>
- Estupiñán, K. (2018). *¿Sabe cómo usar los nuevos contenedores de aseo? Aquí le enseñamos*. Obtenido de <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/habitat/como-usar-los-nuevos-contenedores-de-aseo>: <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/habitat/como-usar-los-nuevos-contenedores-de-aseo>
- European Commission. (2017). *The role of waste-to-energy in the circular economy*. Obtenido de <https://ec.europa.eu>: <https://ec.europa.eu/environment/waste/waste-to-energy.pdf>
- Fei, F., Wen, Z., Huang, S., & Clercq, D. D. (2018). Mechanical biological treatment of municipal solid waste: Energy efficiency, environmental impact and economic

feasibility analysis. *Journal of Cleaner Production*, 178, 731-739.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.060>

- Fernandez-Gonzalez, J. M. (2014). Valorización energética de Residuos Sólidos Urbanos. *I Jornada Tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos: Problemas y perspectivas en su gestión, tratamiento y valorización*.
- Forman, E. & Gass, S. (2001). The Analytic Hierarchy Process: An Exposition. (<http://www.jstor.org/stable/3088581>, Ed.) *Operations Research*, 49(4), 469 -486.
- García L, R. (2019). *Tratamiento de residuos urbanos o municipales. UF0285*. Logroño: Editorial Tutor Formación. Obtenido de <https://bdbiblioteca.universidadean.edu.co:2102>
- GEOLINE. (2020). *Anaerobic Digestion Diagram*. Obtenido de <https://www.geoline.ie>: <https://www.geoline.ie/anaerobic-digestion/digestate-storage-lagoon/anaerobic-digestion-diagram/>
- Goepel, K.D. (2018a). *AHP Online System - AHP-OS*. Recuperado el 2020, de <https://bpmsg.com/ahp/>
- Goepel, K.D. (2018b). Implementation of an Online Software Tool for the Analytic Hierarchy Process (AHP-OS). *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, 469-487.
- GSTC. (2020). *Waste to Energy Gasification*. Obtenido de <https://www.globalsyngas.org>: <https://www.globalsyngas.org/syngas-production/waste-to-energy-gasification/>
- Guevara, D., Osorio, J., y Manyoma, P. (2013). *Selección de sistema de tratamiento de residuos sólidos residenciales a través de técnicas multicriterio*. Universidad del Valle, Santiago de Cali.
- Hall, D., & Nguyen, T. A. (2012). *WASTE MANAGEMENT IN EUROPE : COMPANIES, STRUCTURE AND EMPLOYEMENT*. Obtenido de www.epsu.org: https://www.epsu.org/sites/default/files/article/files/2012_Waste_mngt_EWC.pdf
- Hernández, J., Marrero, N., Minott, D., & Quintana, J. (2011). *Viability of Current and Emerging Technologies for Domestic Solid Waste Treatment and Disposal: Implications on Dioxin and Furan Emissions*. Obtenido de <http://documents1.worldbank.org>: <http://documents1.worldbank.org/curated/pt/957511468266721018/pdf/701660ESW0P1250an0Emissions00Final0.pdf>

- Hernández, R., Mendoza, C. (2018). *Metodología de la Investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. Ciudad de México, México : McGraw Hill Interamericana Editores, S.A.
- ILPES. (2008). *Manual metodológico de evaluación multicriterio para programas y proyectos*. Santiago de Chile, Chile: Naciones Unidas.
- INERCO. (2018). *Valoración energética de residuos: Proyecto WTE Colombia*. Unidad de Planeación Minero Energética, Bogotá.
- Ishizaka, A., Balkenborg, D., & Kaplan, T. (2011). Does AHP help us make a choice? An experimental evaluation. *The Journal of the Operational Research Society*, 62(10), 1801 - 1812.
- ISWA. (2012). *Solid Waste: Guidelines for Successful Planning*. Obtenido de www.iswa.org: https://www.iswa.org/index.php?eID=tx_iswaknowledgebase_download&documentUid=2512
- Kaza, S., Yao, L., Bahada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a Waste 2.0*. Obtenido de <https://openknowledge.worldbank.org/>: <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/30317/9781464813290.pdf?sequence=12&isAllowed=y>
- Liu, C., Nishiyama, T., Kawamoto, K., & Sasaki, S. (2020). *CCET guideline series on intermediate municipal solid waste treatment technologies Waste-to-Energy*. United Nations Environment Programme. Obtenido de https://www.iges.or.jp/en/publication_documents/pub/policysubmission/en/10877/WtEI_guideline_web_200615.pdf
- Martínez, J., Montoya, N., y Sierra, M. (2014). Energía del futuro: bioalcoholes a partir de Residuos Sólidos Urbanos (RSU). *Revista Escuela de Administración de Negocios*, 77, 64-80. doi:<https://doi.org/10.21158/01208160.n77.2014.816>
- MINMINAS. (2016). *Guía práctica para la aplicación de los incentivos tributarios de la Ley 1715 de 2014*. Obtenido de www1.upme.gov.co/: https://www1.upme.gov.co/Documents/Cartilla_IGE_Incentivos_Tributarios_Ley1715.pdf
- Molano Camargo, F. (2019). El relleno sanitario Doña Juana en Bogotá: la producción política de un paisaje tóxico. *HISTORIA CRÍTICA*, 127-149.
- Moratorio, D., Rocco, I y Castelli, M. (Agosto de 2012). Conversión de residuos sólidos en energía. *Memoria de Trabajos de Difusión Científica y Técnica*(10).

- Mutz, D., Hengevoss, D., Hugi, C., & Gross, T. (2017). *Opciones para el aprovechamiento energético de residuos en la gestión de residuos sólidos urbanos*. Obtenido de <https://www.giz.de>:
<https://www.giz.de/en/downloads/Guia%20GIZ%202017%20WasteToEnergy%20-%20SP.pdf>
- Naciones Unidas. (2020). *Objetivo 11: Ciudades y comunidades sostenibles*. Obtenido de <https://www.undp.org>: <https://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals/goal-11-sustainable-cities-and-communities.html>
- Observatorio Ambiental de Bogotá. (2020). *Disposición de Residuos en el Relleno Sanitario Doña Juana Per Cápita*. Obtenido de <https://oab.ambientebogota.gov.co>:
<https://oab.ambientebogota.gov.co/indicadores/?id=e98d4740-1166-11ea-969e-a1087e0e66ee>
- Osorio, J. y Orejuela, J. (Septiembre de 2008). El proceso de Análisis Jerárquico (AHP) y la toma de decisiones multicriterio. Ejemplo de Aplicación. (U. t. Pereira, Ed.) *Scientia et Technica*, XIV(39), 247-252. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/849/84920503044.pdf>
- Pacheco, J., y Contreras, E. (2008). *Manual metodológico de evaluación multicriterio para programas y proyectos*. Instituto Latinoamericano y del Caribe de Planificación Económica y Social (ILPES). Santiago de Chile: Naciones Unidas.
- Qazi, W. A., & Abushammala, M. F. (2020). Chapter 10 - Multi-criteria decision analysis of waste-to-energy technologies. En J. Ren, *Waste-to-Energy Multi-Criteria Decision Analysis for Sustainability Assessment and Ranking* (págs. 265-316). Hong Kong: Elsevier. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816394-8.00001-X>
- Quina, M., Bordado, J., & Quinta-Ferreira, R. M. (2011). Air Pollution Control in Municipal Solid Waste Incinerators. En M. Khallaf, *The Impact of Air Pollution on Health, Economy, Environment and Agricultural Sources* (págs. 331-358). Croatia: InTech. Obtenido de <https://www.intechopen.com/books/the-impact-of-air-pollution-on-health-economy-environment-and-agricultural-sources/air-pollution-control-in-municipal-solid-waste-incinerators>
- Ramos Gutierrez, P. (2020). Una tecnología equivocada, el problema del Relleno Sanitario Doña Juana. *UN Periodico Digital*. Obtenido de <https://unperiodico.unal.edu.co/pages/detail/una-tecnologia-equivocada-el-problema-del-relleno-sanitario-dona-juana/>
- Rand, T., Haukohl, J., & Marxen, U. (2000). *Municipal Solid Waste Incineration Requirements for a Successful Project*. The World Bank: Washington.

- Rao, S., Tian, Z., Satinder, B., Krishnamoorthy, H., Rapa, P., & Mausam, V. (2018). *Handbook of Environmental Engineering*. New York: Mc Graw Hill Education. Obtenido de <https://bdbiblioteca.universidadean.edu.co:2292/content/book/9781259860225>
- Resolución 652. (2018). 652. Obtenido de <http://www.uaesp.gov.co>: <http://www.uaesp.gov.co/sites/default/files/documentos/Decreto%20652%20de%202018.pdf>
- Resolución CAR 1351. (2014). *Por medio de la cual se modifica la licencia ambiental única otorgada para el proyecto "Relleno sanitario Doña Juana" y se toman otras determinaciones*. Obtenido de www.uaesp.gov.co: http://www.uaesp.gov.co/images/LICENCIA_CAR_1351.pdf
- Rueda, M. R. (2018). Lo que debe saber sobre el nuevo esquema de aseo en Bogotá. *El Espectador*. Obtenido de <https://www.elespectador.com/noticias/bogota/lo-que-debe-saber-sobre-el-nuevo-esquema-de-aseo-en-bogota/>
- Saaty, T. (1994). How to make a decision: The Analytic Hierachy Process. (<http://www.jstor.org/stable/25061950>, Ed.) *Interfaces*, 6, 19-43.
- Saaty, T. (2013). The Modern Science of Multicriteria Decision Making and Its Paractical Applications. The AHP/ANP Approach. (<http://www.jstor.org/stable/24540487>, Ed.) *Operation Research*, 61(5), 1101-1118.
- Sadok, W., Angevin, F., Bergez, J.-É., Bockstaller, C., Colomb, B., Guichard, L., . . . Doré, T. (2008). Ex ante assessment of the sustainability of alternative cropping systems: implications for using multi-criteria decision-aid methods. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 163–174. Obtenido de <https://link.springer.com/article/10.1051/agro:2007043>
- Sanchez, J. (2012). *Modelación de la incineración de residuos sólidos urbanos como alternativa complementaria al relleno sanitario doña Juana en Bogotá*. Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana.
- Semana. (2020). *El 78% de los hogares colombianos no recicla*. Obtenido de <https://sostenibilidad.semana.com>: <https://sostenibilidad.semana.com/medio-ambiente/articulo/el-78-de-los-hogares-colombianos-no-recicla/44231>
- SEMARNAT. (1999). *Minimización y Manejo Ambiental de Residuos Sólidos*. México: Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental-SEMARNAT.

- Sharmaa, S., Basua, S., P.Shettib, N., Kamalic, M., Walvekard, P., & Aminabavid, T. M. (2020). Waste-to-energy nexus: A sustainable development. *Environmental Pollution*, 267, 1-20. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115501>
- SIGAB. (2020). *SIGAB, LA PLATAFORMA AL SERVICIO DE LOS CIUDADANOS*. Obtenido de <https://sigab.gov.co>: <https://sigab.gov.co/nuevo-esquema-de-aseo/>
- Stantec Consulting. (2011). *WASTE TO ENERGY A Technical Review of Municipal Solid Waste Thermal Treatment Practices*. Obtenido de www2.gov.bc.ca: <https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/environment/waste-management/garbage/bcmoewteemissionsrevmar2011.pdf>
- SUI. (2020). *Toneladas de residuos sólidos que ingresan al sitio de disposición final - Resolución SSPD N° 20174000237705 de 2017*. Obtenido de <http://www.sui.gov.co>: <http://www.sui.gov.co/web/aseo/reportes/tecnico-operativos/toneladas-de-residuos-solidos-que-ingresan-al-sitio-de-disposicion-final-resolucion-sspd-n-20174000237705-de-2017>
- Superintendencia de Servicios Públicos & DNP. (2018). *Informe de Disposición Final de Residuos Sólidos – 2017*. Obtenido de www.superservicios.gov.co: https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Publicaciones/Publicaciones/2018/Dic/2._disposicion_final_de_residuos_solidos_-_informe_2017.pdf
- Superservicios. (2017). *EVALUACIÓN INTEGRAL DE PRESTADORES CENTRO DE GERENCIAMIENTO DE RESIDUOS DOÑA JUANA S.A. E.S.P.* Obtenido de www.superservicios.gov.co: <https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Acueducto%2C%20alcantarillado%20y%20aseo/Aseo/2018/Sep/evaluacionintegral2017-centrodegerenciamientoderesiduosdonajuanas.a.e.s.p.pdf>
- Tan, Y. (2013). *Feasibility Study on Solid Waste to Energy Technological Aspects*. Obtenido de <http://funginstitute.berkeley.edu>: <http://funginstitute.berkeley.edu/wp-content/uploads/2014/01/SolidWasteToEnergy.pdf>
- Texeira Coelho, S. (2020). Chapter 3 - Best Available Technologies (BAT) for WtE in Developing Countries. En S. Texeira Coelho, & R. Diaz-Chavez, *MUNICIPAL SOLID WASTE ENERGY CONVERSION IN DEVELOPING COUNTRIES* (págs. 63-105). Amsterdam: Elsevier.
- Torres, A. (2018). *¿Nadie lo pensó? Nuevos contenedores de basura apenas pueden ser cargados*. Obtenido de <https://caracol.com.co>: https://caracol.com.co/radio/2018/12/06/tendencias/1544136586_284627.html

- Trozzi, C. (2019). *Biological treatment of waste – anaerobic digestion at biogas facilities*. Obtenido de www.eea.europa.eu: <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019/part-b-sectoral-guidance-chapters/5-waste/5-b-2-biological-treatment>
- Tsydenova, N., Morillas, A. V., Hernández, Á. M., Soria, D. R., Wilches, C., & Pehlken, A. (2019). Feasibility and Barriers for Anaerobic Digestion in Mexico City. *Sustainability*, 11(15). Obtenido de <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/15/4114>
- UAESP. (2004). *Plan de Manejo Integral de Residuos Sólidos*. Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos, Bogotá.
- UAESP. (2012a). *Caracterización de los residuos sólidos residenciales generados en la ciudad de Bogotá*. Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos, Bogotá.
- UAESP. (2012b). *Resolución 799*. Obtenido de http://www.uaesp.gov.co/uaesp_jo/images/SubdAprovechamiento/Resolucion799.PDF
- UAESP. (2013). *Proyecto de Estudio del Plan Maestro para el Manejo Integral de Residuos Sólidos en Bogotá, D.C.* Obtenido de <http://www.uaesp.gov.co>: http://www.uaesp.gov.co/Uaesp_jo/images/SubdRBL/jica/GEJR13213_BOGOTA_I NFORME2.pdf
- UAESP. (2015). *Plan de Gestión Integrada de Residuos Sólidos 2016 - 2027 "Bogotá se orienta hacia el aprovechamiento de sus residuos"*. Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos, Bogotá.
- UAESP. (2018). *DOCUMENTO TÉCNICO DE SOPORTE PROPUESTA MODIFICACION DECRETO DISTRITAL No. 620 DE 2007*. Obtenido de www.habitatbogota.gov.co: <https://www.habitatbogota.gov.co/sites/default/files/archivos-adjuntos/DTS%20mod%20Dec.%20620%20de%202007%20%28UAESP%29%20.pdf>
- UAESP. (2018). *Línea Base Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos de Bogotá*. Bogotá.
- UAESP. (2020a). *ESPECIALES UAESP RELLENO SANITARIO DOÑA JUANA*. Obtenido de <http://www.uaesp.gov.co>: <http://www.uaesp.gov.co/especiales/relleno/>
- UAESP. (2020b). *Informe mensual de Supervisión y Control Disposición Final Abril 2020*. Obtenido de www.uaesp.gov.co: <http://www.uaesp.gov.co/sites/default/files/documentos/Informe%20SyC%20Abril%202020.pdf>

- UNEP. (2005). *SOLID WASTE MANAGEMENT*. Obtenido de [https://wedocs.unep.org:
http://hdl.handle.net/20.500.11822/30733](https://wedocs.unep.org/http://hdl.handle.net/20.500.11822/30733)
- UNEP. (2009). *Developing Integrated Solid Waste Management Plan Training Manual* . Obtenido de [https://wedocs.unep.org:
https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/7770/ISWMPan_Vol4.pdf
?sequence=3&isAllowed=y](https://wedocs.unep.org/https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/7770/ISWMPan_Vol4.pdf?sequence=3&isAllowed=y)
- UNEP. (2019). *Waste to Energy: Considerations for Informed Decision-making*. Obtenido de [www.unenvironment.org:
http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/28413/WTEfull.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://www.unenvironment.org/http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/28413/WTEfull.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- UN-HABITAT. (2010). *SOLID WASTE MANAGEMENT IN THE WORLD'S CITIES WATER AND SANITATION IN THE WORLD'S CITIES 2010*. Obtenido de [https://thecitywasteproject.files.wordpress.com:
https://thecitywasteproject.files.wordpress.com/2013/03/solid_waste_management_in_the_worlds-cities.pdf](https://thecitywasteproject.files.wordpress.com/https://thecitywasteproject.files.wordpress.com/2013/03/solid_waste_management_in_the_worlds-cities.pdf)
- Vaquiroy, L., y Barjas, N. (2017). *Evolución de la prestación del servicio de aseo en Bogotá, producto del cambio de esquema que se presentó en 2012*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Veeduría Distrital. (2018). *Diagnóstico del modelo de aseo en Bogotá. El nuevo PGIRS*. Bogotá.
- Wajeena, Q., Mohammed, A., Mohammed-HashamAzam, & Mohammed, Y. (2018). WASTE-TO-ENERGY TECHNOLOGIES: A LITERATURE REVIEW. *Journal of Solid Waste Technology & Management*, 387-409.
- Whiting, K., Fanning, M., & Wood, S. (2013). *WASTE TECHNOLOGIES: WASTE TO ENERGY FACILITIES*. Obtenido de [http://large.stanford.edu:
http://large.stanford.edu/courses/2017/ph240/kim-d2/docs/wsp-may13.pdf](http://large.stanford.edu/http://large.stanford.edu/courses/2017/ph240/kim-d2/docs/wsp-may13.pdf)
- Yajure, C., y Guzmán, Y. (Septiembre de 2017). Estudio comparativo de toma de decisiones multicriterio para la jerarquización de tecnologías de energías renovables a utilizar en la producción de electricidad. (U. T. Pereira, Ed.) *Scientia et Technica*, 22(3), 273-280.
- Young, G. C. (2010). *Municipal Solid Waste To Energy Conversion Processes*. Hoboken: Wiley.

ANEXOS

Anexo 1. Fichas Tecnologías

Cantidad y tipo de residuos generados en Bogotá

En Bogotá la generación de residuos en el año 2018 fue de 2.281.620 t/año y se proyecta que en 2030 sea de 2.756.327 t/año basado en el crecimiento poblacional previsto por el DANE, por lo tanto, la generación de residuos per-cápita promedio anual corresponde a 313 Kg/año, la producción de residuos orgánicos es predominante en la ciudad, seguido por los plásticos, el papel, y el cartón y el poder calorífico inferior de estos de acuerdo con **(UAESP, 2012)**, es de 31,32 MJ/Kg. De estos residuos en promedio anualmente son valorizables energéticamente 1.893.866.091 Kg anuales.

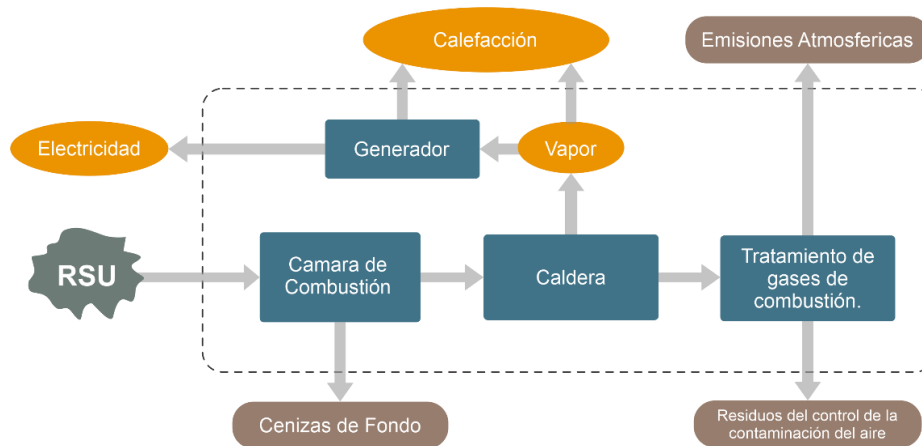
El porcentaje promedio generado de residuos por tipo de material considerando los datos disponibles entre 2011 y 2018 refiere; 2,82% de cartón, 0,52% de caucho, 0,47% de cenizas, 0,38 % de cerámicas, 0,43% de cuero, 0,40% de hueso, 0,31% de ladrillo, 0,90% de madera, 60,31% de materia orgánica, 0,93% de metales, 30% de minerales, 5,95% de papel, 15,09% de plástico, 3,92% de material textil y 1,8% de vidrio. Castells **(2005)**, plantea que desde el punto de vista energético se deben tener en cuenta los siguientes grupos de residuos:

1. Materia orgánica fermentable. Residuos de alimentos y agropecuarios.
 2. Inertes y cenizas: metales, vidrios, pétreos.
 3. Combustibles: plásticos, cartón y papel, textiles.
-

1. INCINERACIÓN

Es una alternativa de tratamiento que por medio de un proceso de combustión completa y controlada reduce el peso y el volumen de los residuos sólidos urbanos, además conlleva a una potencial recuperación de energía (Rao, y otros, 2018).

Diagrama de flujo básico del proceso de incineración de residuos



Fuente: (Liu, Nishiyama, Kawamoto, & Sasaki, 2020)

Este proceso utiliza principalmente la fracción de residuos sólidos urbanos que no son susceptibles de aprovechamiento o que por sus condiciones o características no es posible reciclarlos y por lo general están mezclados. En el proceso de combustión, los residuos circulan por una parrilla donde inicialmente se realiza un secado de los RSU a una temperatura de 100 a 250 °C; luego de pasar por diferentes etapas, los RSU son sometidos a temperaturas de 850 a 1.200°C en donde se produce la combustión liberando gases y sólidos. Las tecnologías de incineración con una etapa de secado integral avanzado son capaces de quemar RSU húmedos con un poder calorífico de alrededor de 7 MJ/kg. (Mutz, Hengevoss, Hugi, & Gross, 2017)

Los residuos sólidos resultantes del proceso de combustión son las cenizas volantes y escorias de los residuos incinerados. Las cenizas volantes son en su mayoría metales y material particulado, y las escorias o residuos de fondo es la combinación del material total o parcialmente quemado, estos residuos deben ser dispuestos como residuos peligrosos. Las cenizas pueden ser sometidas a procesos de valorización para la fabricación de morteros para construcción (CEDEX, 2014).

Los gases resultantes de la combustión contienen monóxido de carbono (CO), óxido de nitrógeno NOx, dióxido de azufre (SO2), cloruro de hidrogeno (HCl), metales pesados, dioxinas y furanos, por lo cual deben ser tratados por medio de sistemas de lavado de gases antes de ser emitidos a la atmosfera.

INCINERACIÓN

ASPECTOS TÉCNICOS

Tipo de RSU	Residuos altamente combustibles, papel, madera, cartones, incluidos hasta un 10% de papeles tratados, desechos de plástico o caucho; fuentes comerciales e industriales (Brunner, 2002)
Preprocesamiento	Se debe hacer una separación para extraer los residuos potencialmente reciclables.
Capacidad de reducir el volumen de RSU	80%
Producto final	Calor o Energía
Cantidades adecuadas para el sistema	Más 450 t/día

DIMENSIÓN AMBIENTAL

Emisiones atmosféricas	Polvos y gases, como el ácido clorhídrico (HCl), el ácido fluorhídrico (HF) y el dióxido de azufre (SO2). Ciertos compuestos que contienen mercurio, dioxinas o dióxido de nitrógeno (NO2)
Gases efecto invernadero	La incineración ayuda a reducir las emisiones de GEI de dos maneras: (1) eliminando las emisiones de gas metano de los rellenos sanitarios cuando se utiliza como alternativa y (2) utilizando la energía de los residuos como sustituto del combustible fósil. (Liu, Nishiyama, Kawamoto, & Sasaki, 2020, pág. 3)
Residuos potencialmente	Sí. Cenizas volantes con posibilidad de ser

INCINERACIÓN

reutilizables	tratadas como agregados para morteros.
---------------	--

Residuos sólidos producto del proceso	Si. Cenizas de fondo y volantes deben ser tratadas como residuos peligrosos.
---------------------------------------	--

Dimensión Económica

Costos de Capital	22-55 EUR/t
-------------------	-------------

Costos de Operación y Mantenimiento	20-35 EUR/t
-------------------------------------	-------------

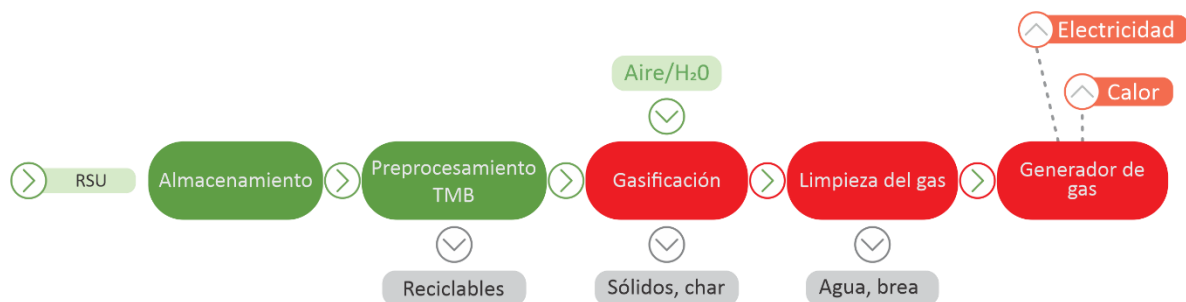
DIMENSIÓN SOCIAL

Aceptación social	La efectividad de la implementación de un proceso de gestión de residuos es altamente dependiente de la aceptación de la comunidad local y esto es especialmente complejo cuando no existen experiencias previas conocidas, sin embargo, es conocido que la actitud de las poblaciones respecto a las alternativas de valorización energética cambia cuando evidencian el problema de manejo actual y lo comparan con la alternativa. (Achillas, Ch., Vlachokostas, Ch. Moussiopoulos, N., Banias, G y Karagiannidis, A., 2011, pág. 862)
-------------------	---

Especialidad de mano de obra	La implementación de cualquier alternativa de valorización energética requiere de personal especializado y que desarrolle capacidades para este tipo de proyectos, esto resulta necesario tanto para el personal del sector público en su rol de regulador y/o ejecutor y para el personal del sector privado como ejecutor. Por lo tanto, el reclutamiento de personal calificado local resulta complejo. (Castells X. E., 2005, pág. 52)
------------------------------	--

2. GASIFICACIÓN

El proceso de gasificación se realiza únicamente con el 25% al 30% de oxígeno necesario para una combustión completa, a diferencia de la incineración donde se realiza una combustión completa sin restricción de oxígeno, o, a diferencia de la pirolisis, que se realiza una descomposición térmica del residuo, sin agregar oxígeno al proceso, en palabras de Castells (2005) “En la gasificación, la energía química contenida en el sólido se convierte en energía química contenida en un gas.”



Fuente: (Cameron, Mozaffarian, & Falzon, 2014)

Esta alternativa reduce el tamaño de los residuos, elimina posibles materiales tóxicos y hace más fácil su gestión final, aunque en este caso, los RSU no son utilizados como combustible para el proceso, de hecho, son la materia prima para obtención por medio de una oxidación parcial a altas temperaturas un gas conocido como gas de síntesis o syngas compuesto por una mezcla de CO y H₂ y algunas cantidades de CO₂, H₂O, N₂ y CH₄, que puede ser utilizado en productos comerciales con un valor importante como combustible para transporte o reemplazar el gas natural (GSTC, 2020). Se ha demostrado que la composición química, el rendimiento y el poder calorífico dependen de la temperatura del proceso y del agente oxidante utilizado, que puede ser oxígeno, aire o vapor o una mezcla de estos, así como del sólido gasificado. (Wajeena, Mohammed, Mohammed-HashamAzam, & Mohammed, 2018).

En este caso los residuos deben ser sometidos a un pretratamiento, porque al proceso no pueden ingresar material inorgánico como metales, vidrios o elementos inertes, ya que estos no pueden ser gasificados. Luego, deben ser triturados y mantener un tamaño pequeño y uniforme de partículas para finalmente secarlos para mantener una humedad por debajo del 15%.

El sistema utiliza el syngas para alimentar el proceso y aporta la energía necesaria para mantener la reacción en el gasificador, y ese mismo producto es utilizado para mover una

turbina de gas y generar electricidad. Se debe tener en cuenta que en el gasificador se va a generar un producto residual como ceniza que puede ser dispuesta como residuo o como fertilizante, material de construcción o fabricación de vidrio.

La gasificación como alternativa de tratamiento de RSU es una opción sostenible, ya que reduce el volumen de los residuos en un 90% con una formación de cenizas de solo el 8% al 12%, mucho menor que la incineración que es del 15% al 20% (Wajeena, Mohammed, Mohammed-HashamAzam, & Mohammed, 2018). Otro punto a favor es que, como debe realizar un pretratamiento donde se retiran materiales como metales, pétreos, vidrios, no es competencia para el reciclaje y la reutilización.

GASIFICACIÓN

ASPECTOS TÉCNICOS

Tipo de RSU	RSU, residuos orgánicos, carbón, RDF (Residue Derived Fuel), lodos, residuos de refinerías, biomasa, PVC, lejía negra, neumáticos y ASR (Automotive Shredder Residue).
--------------------	--

Preprocesamiento	Si. Se deben remover todos los materiales inorgánicos como metales, vidrios, peligrosos y sustancias inertes. Además, se deben triturar para mantener un tamaño de partícula uniforme. Adicional se debe secar o retirar los residuos de comida para mantener una humedad por debajo del 15% para esto.
-------------------------	---

Capacidad de reducir el volumen de RSU	90%
---	-----

Producto final valorizable	Syngas (CO ₂ , y H ₂ y pequeñas cantidades de N ₂ , H ₂ O, CO ₂ y CH ₄)
-----------------------------------	--

Capacidad de procesamiento	250 – 500 t/día
-----------------------------------	-----------------

DIMENSIÓN AMBIENTAL

Emisiones atmosféricas	Aproximadamente la mitad de las emisiones de CO ₂ de la gasificación de RSU es biogénica y neutra en
-------------------------------	---

GASIFICACIÓN

carbono; por lo tanto, la mitad de la energía producida es energía renovable. Además, es un “procesos cerrados” por lo cual no genera emisiones al aire. Las emisiones que se producen en el proceso lo hacen en la combustión de Syngas para generar energía. CO, NOx y material particulado, son controladas con sistemas de filtrado y lavado de gases.

Gases efecto invernadero

Una planta de gasificación de RSU puede causar una reducción neta en las emisiones de gases de efecto invernadero, si la energía generada por la instalación de gasificación de RSU desplaza la generación de energía de combustibles fósiles existente.

Residuos potencialmente reutilizables

Sí, ceniza que puede ser reutilizada como fertilizante, material de construcción o fabricación de vidrio. (Wajeena, Mohammed, Mohammed-HashamAzam, & Mohammed, 2018)

Residuos sólidos generados

La gasificación produce un residuo en forma de escoria, ceniza o escoria vidriosa que, si no es aprovechada de alguna forma, debe ser dispuesta en relleno sanitario. Estos residuos son aproximadamente el 6% del peso de los RSU procesados. (Hernández, Marrero, Minott, & Quintana, 2011)

Dimensión Económica

Costos de Capital

35-40 EUR/t

Costos de Operación y Mantenimiento

30-40 EUR/t

DIMENSIÓN SOCIAL

Aceptación social

Donde la combustión WTE es objeto de controversia, la gasificación es una alternativa que puede ganar más fácilmente la aceptación del público, como la gasificación de residuos de combustión no lo hace

GASIFICACIÓN

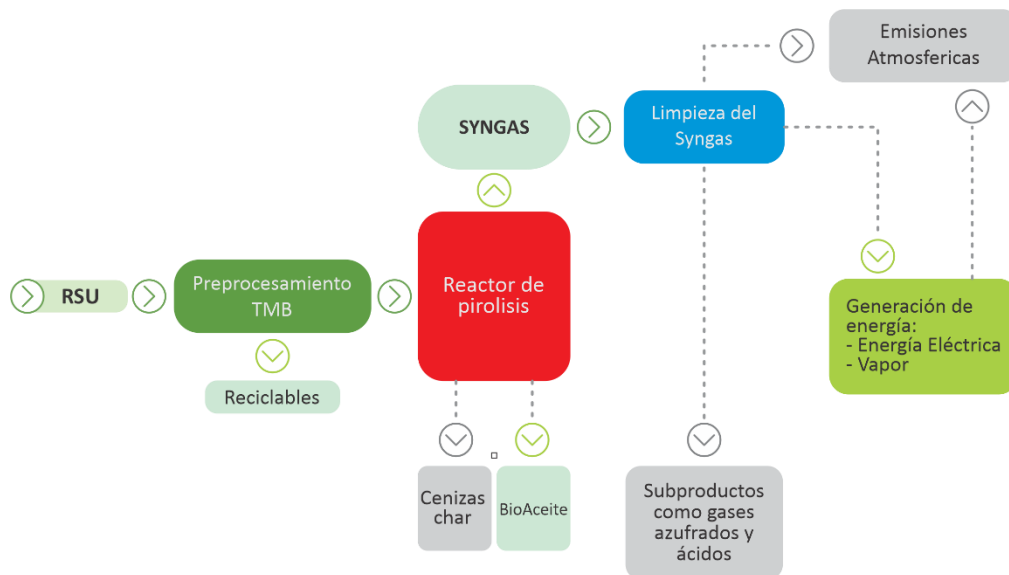
vinculación.

Especialidad de mano de obra

La implementación de cualquier alternativa de valorización energética requiere de personal especializado y que desarrolle capacidades para este tipo de proyectos, esto resulta necesario tanto para el personal del sector público en su rol de regulador y/o ejecutor y para el personal del sector privado como ejecutor. Por lo tanto, el reclutamiento de personal calificado local resulta complejo. (Castells X. E., 2005, pág. 52)

3. PIRÓLISIS

En este proceso se descomponen todos los compuestos basados en carbono que contienen los residuos dando como resultado gases, hidrocarburos condensables y un residuo carbonoso sólido llamado char, también llamado coque. (Castells X. E., 2005). No hay aire ni oxígeno y no se produce una combustión directa. El proceso es endotérmico.



Fuente: (Young, 2010) y (Campos, Zamenian, Koo, & Goodman, 2015)

Cada uno de los productos resultado de la pirólisis cuenta con características particulares que los hace aprovechables y aptos para ser utilizados como fuentes de generación de energía o como combustibles para el mismo proceso de pirólisis u otras aplicaciones industriales. El proceso de pirólisis a bajas temperaturas (400 °C) produce más producto líquido que gas, y a altas (800 °C) temperaturas produce más gas que líquido (Whiting, Fanning, & Wood, 2013). El gas, llamado gas de síntesis o Syngas, contiene H₂, CH₄, CO, CO₂, C₂-C₆ entre otros gases que dependen de las condiciones de la operación y del material pirolizado. Este gas tiene un poder calorífico inferior (PCI) de 2.744 Kcal/m³. El hidrocarburo condensable, que es líquido a temperatura ambiente, contiene agentes químicos como ácido acético, acetona y metanol en forma de aceite y/o alquitrán. Por último, el coque o char, es carbono puro mezclado con material inerte, que tiene un poder calorífico de 18 Mj/Kg (equivalente a 4.300 Kcal/Kg) y es muy apto para utilizar como combustible (Castells X. E., 2005).

Dentro de las ventajas ambientales de este proceso está, que al ser un proceso que se realiza en ausencia de oxígeno, imposibilita la formación de dioxinas y furanos. Además, el propio residuo resultado del proceso es utilizado como fuente de combustible, repercutiendo en un considerable ahorro de energía.

Pirólisis

Aspectos Técnicos

Tipo de RSU	RSU, RDF, aguas residuales, lodos, carbón, neumáticos, ASR, biomasa, cloruro de polivinilo.
--------------------	---

Preprocesamiento	Si. Los RSU deben ser clasificados, triturados y secados. La clasificación elimina los materiales inorgánicos como vidrio, metal, inertes y contaminantes. El resto de los desechos se tritura en partículas pequeñas y uniformes de hasta 50 mm de diámetro para garantizar la consistencia de los desechos. Por último, se reduce el contenido de humedad al 20%, la materia prima se envía a una secadora o los desechos de alimentos se eliminan de la materia prima.
-------------------------	---

Capacidad de reducir el volumen de RSU	70% - 90% (Qazi & Abushammala, Multi-criteria decision analysis of waste-to-energy technologies, 2020)
---	--

Producto final	Syngas (se produce a altas temperaturas), bioaceite o aceite de pirólisis (se produce a bajas temperaturas)
-----------------------	---

Cantidades adecuadas para el sistema	10 – 100 t/día
---	----------------

Dimensión Ambiental

Emisiones atmosféricas	Se general los gases habituales de un proceso de combustión al utilizar el gas como medio de producción de energía SO ₂ , NO _x , CO y material particulado (Baggio, Baratieri, Gasparella, & Longo, 2008).
-------------------------------	--

Gases efecto invernadero	Todos los sistemas térmicos de valorización de residuos modernos tienen dispositivos de control de emisiones
---------------------------------	--

Pirólisis

previniendo la liberación de gases de efecto invernadero. Al ser un proceso térmico en ausencia de oxígeno, limita la producción de subproductos peligrosos como dioxinas y furanos.

Residuos sólidos producto del proceso

Se producen mezclas de gases, cenizas, escoria y metales al final de las reacciones en el reactor de pirólisis.

Residuos potencialmente reutilizables

La ceniza y escoria puede ser utilizado como agregados para concreto o asfalto.

Dimensión Económica

Costos de Capital

35-40 EUR/t

Costos de Operación y Mantenimiento

30-40 EUR/t

Dimensión Social

Aceptación social

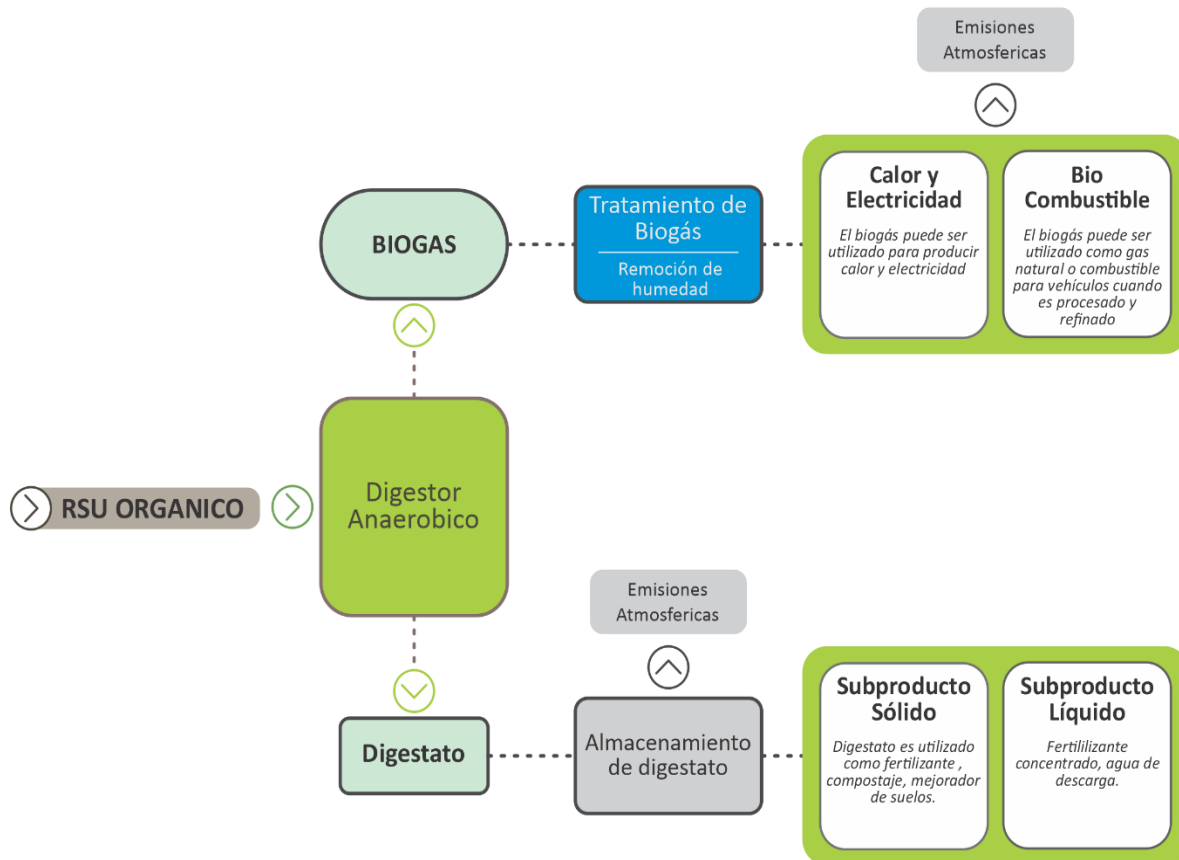
Los proyectos de WtE en general no tienen gran aceptación entre la sociedad convirtiéndose en un gran obstáculo a su desarrollo. Las principales causas son: localización del sitio, interferencia con las 3r y provocar a aumentos en la producción de residuos para cumplir con el flujo necesario de residuos para no sobre utilizar las plantas de WtE (UNEP, 2019).

Especialidad de mano de obra

Requiere profesionales altamente calificados y, por lo tanto, solo adecuado para países desarrollados.

4. DIGESTIÓN ANAERÓBICA

La digestión anaeróbica es un proceso bioquímico que consiste en la descomposición, por medio de microorganismos y en ausencia de oxígeno (anaerobia), de la materia orgánica para producir un gas combustible, conocido como biogás, que está compuesto en su mayoría por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) y otros gases como H_2S , H_2 , NH_3 en pequeñas proporciones y tiene un poder calorífico inferior (PCI) aproximado de 5.250 Kcal/m³, para un gas con un porcentaje de metano del 60%.



Fuente: Elaboración propia, con base en (Mutz, Hengevoss, Hugi, & Gross, 2017)

Este gas puede ser utilizado para producir calor y electricidad por medio de una planta termoeléctrica combinada o motores de combustión. Este gas debe ser sometido a un proceso de limpieza antes de ser utilizado, eliminando el ácido sulfhídrico; que es corrosivo, así como la humedad por el vapor de agua que contiene y es perjudicial para los equipos en los que va a ser usado el biogás. Como resultado de la digestión

anaeróbica también se obtiene un lodo residual orgánico o digestato que puede ser utilizado como abono, acondicionador de suelos o fertilizante. La composición de este producto depende de los residuos utilizados, el tipo de biodigestor y los parámetros configurados durante el proceso.

La digestión anaeróbica recibe los siguientes materiales/residuos como materia prima:

- Fracción orgánica de RSU.
- Residuos industriales orgánicos.
- Aguas residuales municipales.
- Residuos ganaderos y agrícolas.
- Desechos forestales.

Para que los anteriores residuos puedan ser utilizados dentro del biodigestor, deben ser sometidos a un pretratamiento donde se remuevan las fracciones de residuos inorgánicos, como metales, plásticos, pétreos o vidrios, luego se trituran para lograr un tamaño de partículas consistente y uniforme.

Según el modo de alimentación, los biodigestores se clasifican en continuos y discontinuos. En el sistema discontinuo se llena la cámara con biomasa y se cierra hasta que finalice el tiempo de retención hidráulica (TRH), que dura entre 20 a 60 días. Este sistema está en desuso. Los biodigestores continuos son más utilizados actualmente, estos no cesan su actividad en ningún momento y tienen un TRH de entre 15 y 25 días.

La digestión anaeróbica tiene ventajas ambientales como la baja emisión de gases de efecto invernadero (GEI), además de tomar un residuo orgánico y convertirlo en dos productos valorizables como lo es el biogás y el digestato; reduciendo la producción de lixiviados y emisiones en el relleno sanitario, así como espacio.

Una desventaja o limitante a este tipo de tratamiento, es la necesidad de realizar la recolección diferenciada de residuos en las ciudades, para garantizar la calidad y homogeneidad de la materia prima para obtener productos de calidad de fácil valorización.

Esta alternativa no depende del poder calorífico de los RSU “no obstante, el contenido energético del sustrato para un digestor anaeróbico tiene un impacto sobre el contenido de energía del rendimiento del biogás. Los sustratos con mayor contenido energético pueden aumentar la calidad del biogás” (Mutz, Hengevoss, Hugi, & Gross, 2017, pág. 51)

Digestión Anaeróbica

Aspectos Técnicos

Tipo de RSU	Fracción orgánica de RSU, lodos de aguas residuales, desechos de jardín no leñosos y desechos forestales, residuos agrícolas, abonos y lodos animales, biomasa de algas y desechos de mataderos y aves de corral.
Preprocesamiento	Debe pasar por procesos de clasificación, trituración y dilución. La clasificación elimina todos los materiales inorgánicos como plásticos, metales, rocas, inertes y vidrio, mientras que la trituración hace que los desechos clasificados sean consistentes con un tamaño de partícula uniforme
Capacidad de reducir el volumen de RSU	50%
Producto final	Biogas (CH ₄ , CO ₂), Digestato (Bioabono)
Cantidades adecuadas para el sistema	0.5 a 500 t/día

Dimensión Ambiental

Emisiones atmosféricas	El proceso como tal se realiza en recipientes cerrados y es poco probable que se produzcan emisiones fugitivas. En el almacenamiento en tanques abiertos de los residuos orgánicos y el digestato generado en el proceso puede causar emisiones de nitrógeno (N), gases de amoníaco (CH ₃) y óxido nítrico (NO). También se pueden producir N ₂ O y CH ₄ , olores y material particulado (Trozzi, 2019).
Gases efecto invernadero	Metano (CH ₄) capturado y utilizado para

Digestión Anaeróbica

generar energía

Residuos sólidos producto del proceso

Digestato

Residuos potencialmente reutilizables

Digestato. Utilizado como fertilizante o para mejoramiento de suelos.

Dimensión Económica

Costos de Capital

14 – 19 EUR/Ton

Costos de Operación y Mantenimiento

10-15 EUR/Ton

Dimensión Social

Aceptación social

La efectividad de la implementación de un proceso de gestión de residuos es altamente dependiente de la aceptación de la comunidad local y esto es especialmente complejo cuando no existen experiencias previas conocidas, sin embargo, es conocido que la actitud de las poblaciones respecto a las alternativas de valorización energética cambia cuando evidencian el problema de manejo actual y lo comparan con la alternativa. (Achillas, Ch., Vlachokostas, Ch. Moussiopoulos, N., Banias, G y Karagiannidis, A., 2011, pág. 862)

Digestión Anaeróbica

Especialidad de mano de obra

La implementación de cualquier alternativa de valorización energética requiere de personal especializado y que desarrolle capacidades para este tipo de proyectos, esto resulta necesario tanto para el personal del sector público en su rol de regulador y/o ejecutor y para el personal del sector privado como ejecutor. Por lo tanto, el reclutamiento de personal calificado local resulta complejo. La necesidad de desarrollo de capacidades para el coprocesamiento y la digestión anaerobia se deberá evaluar con atención; es más fácil de cubrir que las necesidades de la incineración y del pirólisis y la gasificación. (Mutz, Hengevoss, Hugi, & Gross, 2017, pág. 52)
