



Estudio de pre-factibilidad de una planta térmica Waste to Energy (WtE), para el aprovechamiento de residuos sólidos municipales en el Valle de Aburrá

Julián Andrés Cardona Giraldo

Tesis de maestría presentada para optar al título de Magíster en Ingeniería

Asesor

Rolando Barrera Zapata, Doctor (PhD) en Ingeniería

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería

Medellín, Antioquia, Colombia

2023

Referencia

- [1] J. Cardona Giraldo, "Estudio de pre-factibilidad de una planta térmica Waste to Energy (WtE), para el aprovechamiento de residuos sólidos municipales en el Valle de Aburrá", Tesis de maestría, Maestría en Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2023.

Estilo IEEE (2020)



Maestría en Ingeniería, Cohorte IV.

Grupo de Investigación Agroindustria & Ingeniería (CERES).



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Agradecimientos

Agradezco a la Universidad de Antioquia por brindarme el reconocimiento de mejor graduado del año 2016 y otorgado la beca para realizar mis estudios de maestría. Al grupo de investigación Agroindustria & Ingeniería (CERES) por abrir sus puertas y brindarme la oportunidad de realizar mi estudio de posgrado.

A mi asesor de tesis, profesor Rolando Barrera Zapata por su acompañamiento, consejos prácticos, paciencia y apoyo incondicional; no tengo más que palabras de admiración y agradecimiento.

A todos los profesores que me han acompañado a lo largo de mi formación profesional, por las enseñanzas compartidas, muchas gracias.

Por ultimo y el más importante, un agradecimiento especial a mi querida esposa Juliana, por su ayuda, palabras de aliento y apoyo, amor y acompañamiento incondicional a través de este proceso que me ayudo a mantenerme firme y no dejarme derrumbar en los momentos difíciles.

Abreviaciones

RSM	Residuos sólidos municipales
WTE	Waste to Energy (Residuos a energía)
CIDET	Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico del Sector Eléctrico
EIA	Escuela de Ingeniería de Antioquia
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
EEUU	Estados Unidos
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Ambiente
SYNGAS	Gas de síntesis (synthesis gas)
SNG	Gas natural sintético (synthetic natural gas)
RDF	Refuse Derived Fuel (Combustible derivado de desperdicios)
FB	Fluidised Bed (Lecho fluidizado en inglés)
BFB	Bubbling Fluidised Bed (Burbujeo de lecho fluidizado en inglés)
CFB	Circulating Fluidised Bed (Lecho fluidizado circulante en inglés)
ISWA	International Solid Waste Association
ERC	Energy Recovery Council
SRF	Solid Recovered Fuel
GEI	Gases de Efecto Invernadero
OCDE	Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico
EVM	Empresas Varias de Medellín
PGIRS	Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos
EPM	Empresas Públicas de Medellín
APS	Área de Prestación de Servicio
CRA	Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico

Símbolos generales

MJ	Mega Joule (Unidad física del sistema internacional para indicar la energía)
kg	Kilogramo (Unidad física del sistema internacional para indicar la masa)
K	Grados Kelvin (Unidad física del sistema internacional para indicar la temperatura)
Mtpa	Millones de toneladas por año
MW	Mega watio (Unidad física del sistema internacional para indicar potencia)
NO _x	Óxidos de nitrógeno
SO _x	Óxidos de azufre
HCL	Ácido clorhídrico
,	Separador de miles
.	Separador de decimales

Tabla de contenido

1 Introducción6

1.1 Introducción y motivación6

1.2 Objetivos11

1.3 Alcance del documento12

2 Estado del arte y antecedentes13

2.1 Tecnologías Waste to Energy13

2.2 Tecnologías de tratamiento térmico16

2.3 Panorama actual de tratamiento de RSM en Colombia y el Valle de Aburrá30

2.3.1 Marco normativo37

2.3.2 Velocidad de generación de residuos38

2.3.3 Caracterización de los RSM en el AMVA41

2.3.4 Transporte, transferencia y disposición final de los RSM en el AMVA45

3 Selección de tecnología y simulación del proceso WTE para el AMVA48

3.1 Selección de la tecnología48

3.2 Desarrollo y validación de un modelo de una planta WtE para la incineración de RSM del AMVA.55

3.2.1 Descripción del proceso55

3.2.2 Descripción del modelo en Aspen Plus56

3.2.3 Validación del modelo62

3.2.4 Simulación de escenarios de operación para la planta66

4 Estudio de prefactibilidad72

4.1 Análisis de localización72

4.2 Evaluación financiera79

4.2.1 Costos de inversión (CAPEX):80

4.2.2 Costos de operación y mantenimiento (OPEX):83

4.2.3 Los ingresos generados por el proyecto:84

4.2.4 Modelo financiero87

5 Sumario y conclusiones91

5.1 Recomendación trabajo futuro94

1 Introducción

1.1 Introducción y motivación

Los residuos son un producto inevitable de la sociedad, los cuales aumentan de manera exponencial con el progreso y las mejoras en las condiciones de vida, es por esta razón que es y será un desafío para las generaciones actuales y futuras, proponer soluciones que permitan gestionar y aprovechar grandes cantidades de residuos de manera sostenible y eficiente, debido a que no es suficiente con el modelo tradicional que busca minimizar la cantidad de residuos mediante actividades de reciclaje y reaprovechamiento, ya que según cifras estimadas por [1], de la composición global a nivel mundial de los Residuos Sólidos Municipales (RSM), aproximadamente solo el 36% es reciclado y reutilizado (metal, vidrio, plástico y papel), mientras que cerca del 64% es depositado en botaderos a cielo abierto o rellenos sanitarios.

Según estudios realizados por [1] y reportados por el Banco Mundial, Colombia se ubica entre los países con mayor generación de residuos per cápita generados a nivel mundial. Adicionalmente y de acuerdo con las cifras entregadas por [2] y el informe nacional sobre disposición final de residuos sólidos [3], en el área metropolitana del Valle de Aburrá se generan aproximadamente entre 54,000 a 72,000 toneladas de residuos sólidos municipales mensuales.

De acuerdo con el más reciente informe del World Energy Council [4], el sector de gestión de residuos se enfrenta a un problema que no puede resolver por sí mismo, sino que requiere del trabajo mancomunado de diferentes sectores, tales como, el sector académico, el sector empresarial y el gubernamental, con el fin de encontrar la manera de aprovechar de manera sostenible y eficiente los residuos sólidos municipales que se están generando. El World Energy Council [4], considera que el sector de la energía podría ser un actor importante en la búsqueda del aprovechamiento de los RSM, debido a su necesidad de satisfacer continuamente una creciente demanda. Permitiendo de esta forma el aprovechamiento de un residuo como un recurso energético. De esta manera la recuperación de energía a partir de los residuos puede mitigar dos problemáticas a la vez: 1) Tratar cantidades de residuos que no se aprovechan y/o reutilizan; y 2) Generar una cantidad significativa de energía térmica que se puede emplear para diferentes propósitos.

Por lo anterior, existe una necesidad urgente de investigar nuevas tecnologías de gestión de residuos sólidos (GRS), tales como los residuos a energía (WTE). En un enfoque de desarrollo sostenible los residuos deben considerarse como un recurso para la recuperación de materiales y energía y no simplemente como un problema de eliminación. Por esta razón se considera importante realizar un estudio de prefactibilidad de una planta WTE de características térmicas ubicada en el Valle de Aburrá, el cual pueda contribuir a la toma de decisiones en torno a eventuales proyectos futuros de estas características, tal como ya se han desarrollado en ciudades de Latinoamérica, tales como Ciudad de México [5], Toluca [6], Valparaíso [6], Buenos aires [7], Santiago de Chile [8], [9], Montevideo [10] y Sao Paulo [11].

Según Christensen [12] el cambio de énfasis en la limpieza pública de las ciudades a la gestión de residuos moderna fue impulsado principalmente por la industrialización, que introdujo nuevos materiales y productos químicos, cambiando drásticamente los tipos y composición de los residuos, y por la urbanización que volvió la gestión de residuos en las zonas urbanas una complicada y costosa operación logística. De acuerdo con Fernando Centeno, Director de Planeación en Investigación en Exergy Ltd [13], el costo mensual de disposición de los residuos sólidos municipales en Medellín asciende a los 2,500 millones de pesos para sus habitantes y la próxima década se necesitarían alrededor de 860,000 millones de pesos para expandir y construir nuevos vertederos. Un estudio realizado por el Banco Mundial [2], [1] muestra los niveles de generación de residuos per cápita para diferentes regiones del mundo. Como se puede ver en la Tabla 1.

Tabla 1. Niveles de generación de residuos a nivel mundial

Región	Población Urbana Total (Millones)	Generación de RSM Totales (Toneladas/día)	Generación RSM per cápita (kg/persona)
África	261	169,120	0.65
Este de Asia y pacifico	777	738,959	0.95
Asia oriental y central	227	254,389	1.12
América latina y el caribe	400	437,545	1.09
Medio Oriente y Norte de África	162	173,545	1.07
Países de la OCDE	729	1,566,286	2.15
Sur de Asia	426	192,411	0.45
Total	2,982	3,532,255	1.19

La Tabla 1 permite observar como el desarrollo económico tiene un impacto significativo en la generación de RSM en un determinado territorio. Adicionalmente, muestra una fuerte correlación entre la generación de residuos per cápita y el nivel de ingresos de las personas.

De acuerdo con el Banco Mundial [1] estima que la generación mundial de residuos se duplicará en 2025 a más de 6 millones de toneladas de residuos por día. En la Tabla 2 se puede apreciar el aumento en la generación de residuos per cápita para cada región en el año 2025.

Tabla 2. Niveles de generación de residuos proyectados a nivel mundial para el año 2025.

Región	Población Urbana Total (Millones)	Generación de RSM Totales (Toneladas/día)	Generación RSM per cápita (kg/persona)
África	518	441,840	0.85
Este de Asia y pacifico	1,230	1,865,380	1.52
Asia oriental y central	240	354,811	1.48
América latina y el caribe	466	728,392	1.56
Medio Oriente y Norte de África	257	369,320	1.43
Países de la OCDE	842	1,742,417	2.07
Sur de Asia	734	567,545	0.77
Total	4,287	6,069,705	1.42

Con base en las proyecciones realizadas por [1] se espera que los países de la OCDE alcancen el pico de generación para 2,050, y los países de Asia oriental y el Pacífico para el año 2,075, mientras que en el África subsahariana los residuos seguirán creciendo hasta el 2,100. Esta preocupante situación ha llevado a algunos países a pensar en cómo administrar grandes cantidades de residuos de manera sostenible, implementando lo que hoy se conoce como “jerarquía de gestión de residuos” [14], la cual da prioridad a la reducción de residuos (control en la fuente), el reciclaje, el compostaje y el aprovechamiento energético de la basura, conocido también como Waste to Energy (WTE), por sobre el depósito en rellenos sanitarios.

De acuerdo con PNUMA [15] la gestión de residuos sólidos parece ser más compleja en países en vías de desarrollo y en transición, donde el creciente volumen y el tipo de residuos, como resultado del crecimiento económico, la urbanización y la industrialización, se está convirtiendo en un problema creciente. Por esta razón se presentan algunos de los modelos o enfoques más utilizados a nivel mundial.

El mundo occidental y partes de Asia desde principios de 1,980 han utilizado el modelo de “jerarquía de los residuos” como el enfoque principal para la gestión de los residuos [12]. Adicionalmente, Münster & Lund [16] establecen que en Europa los gobiernos y las autoridades locales deben cumplir con el modelo de “jerarquía de los residuos”. El concepto y el mensaje principal de este modelo de gestión de residuos es que las prioridades deberían ser las siguientes:

1. Prevención de residuos y uso de tecnologías limpias
2. Reusar
3. Reciclar materiales
4. Recuperación (en términos de materiales y energía)
5. Disposición (incluyendo rellenos sanitarios y quema de biomasa sin recuperación de energía)

Con el tiempo las denominaciones y el nombre han variado con respecto al modelo de “Jerarquía de los residuos”, en Japón por ejemplo el enfoque es llamado modelo de las 3R, para indicar el concepto de reducir, reusar y reutilizar. Adicionalmente, han surgido otros modelos o enfoques de gestión, tales como:

- **Modelo “Residuos cero” (Zero Waste)**

El modelo Zero Waste es un modelo de gestión que está basado en el rediseño de los ciclos de vida de los recursos para que todos los productos se reutilicen, hace hincapié en la prevención de residuos en lugar de su disposición final, evitando de esta forma que no se envíen residuos a los vertederos o se haga uso de estos mediante incineradores [17].

En la actualidad el modelo Zero Waste tiene serios problemas para lograr su implementación debido a que este modelo tiene como propósito final, no generar residuos o que estos sean biodegradables; sin embargo, desde el punto de vista técnico y práctico, actualmente no es posible lograr una completa reutilización, rediseño o cambio de los materiales con los cuales se realizan infinidad de productos.

- **Modelo Evaluación del ciclo de vida (Life Cycle Assessment)**

La evaluación del ciclo de vida representa todos los flujos másicos y las emisiones, así como el uso y la producción de energía dentro del sistema de gestión de residuos y cualquier proceso

involucrado en la fabricación del producto que posteriormente da lugar al residuo, con el fin de evaluar y cuantificar las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad y definir estrategias de mejora ambiental [18].

Como se puede apreciar, se han desarrollado y se siguen proponiendo modelos de gestión para el manejo de residuos, ya que su manejo varía significativamente entre los diferentes países, regiones y ciudades, debido a diferentes factores como: tipo de residuo, disponibilidad de tierra, posibilidad de utilizar los materiales y la energía contenida en los residuos, los diferentes costos asociados al manejo de los residuos y el enfoque político; de acuerdo con [1] la opción de disposición más utilizada actualmente a nivel mundial sigue siendo el vertimiento (Ver Figura 1), a pesar de ser la práctica de gestión de residuos menos deseable. Incluso en Europa el vertimiento es la tecnología predominante y solo en unos pocos países se recicla más del 25% de los residuos, tal como se observa en la Figura 2.

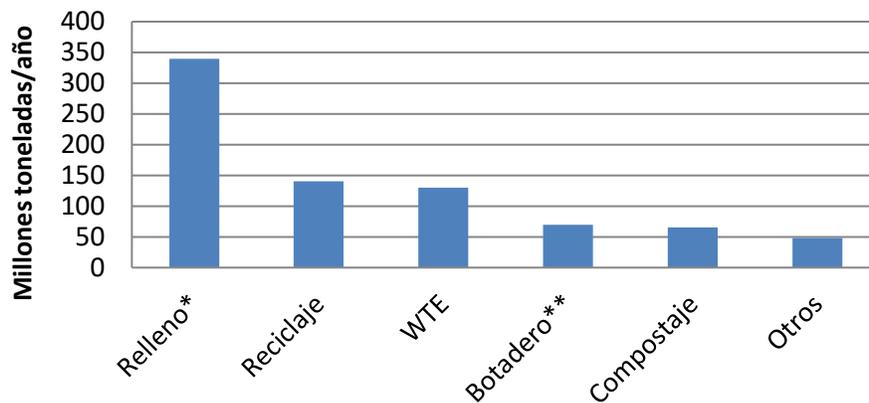


Figura 1. Opciones de disposición de residuos más utilizadas a nivel mundial, adaptado de [1].

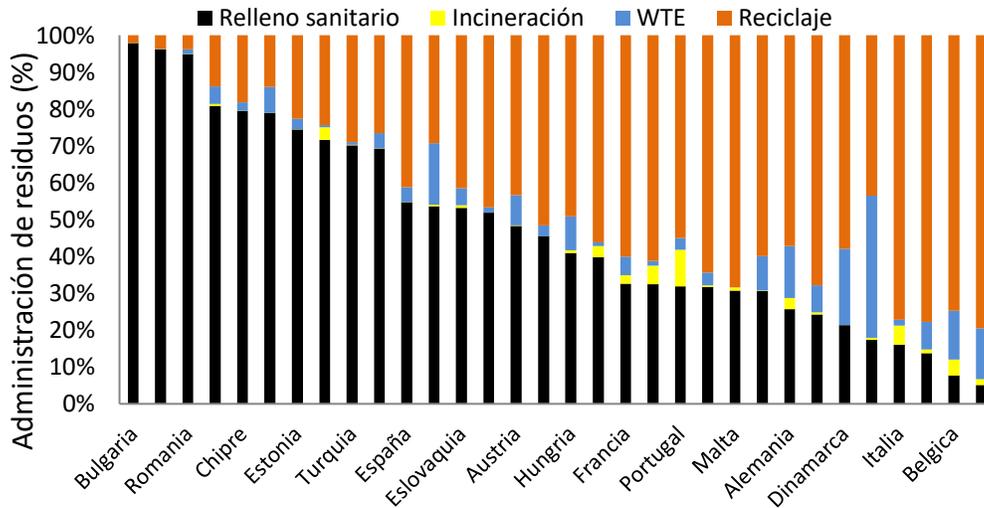


Figura 2. Opciones de disposición de residuos más utilizadas en Europa, adaptado de [19].

Se suele pensar que el reciclaje y los procesos WTE son alternativas mutuamente excluyentes y competitivas, ya que al implementar una planta WTE se reduce la tasa de reciclaje en una comunidad; sin embargo, esto no es cierto y se puede observar que son actividades complementarias, ya que el reciclaje previo al aprovechamiento de las tecnologías WTE, permite mejorar el poder calorífico del residuo y de esta manera mejorar la eficiencia del proceso. Esta sinergia se hace evidente en la Figura 2, en la cual se observa que las naciones que han reducido o incluso eliminado la disposición en vertederos lo han hecho por medio de una combinación entre el reciclaje y la recuperación de energía a través de procesos WTE.

1.2 Objetivos

El presente trabajo tiene los siguientes objetivos:

- **Objetivo general:** Desarrollar un estudio de prefactibilidad de una planta Waste to Energy térmica en el Valle de Aburrá.
- **Objetivos específicos:** Determinar la tecnología más apropiada para una planta Waste to Energy térmica ubicada en el Valle de Aburrá. Implementar el modelo de planta térmica en Aspen Plus, con el fin de evaluar diferentes escenarios a partir de simulaciones y realizar la evaluación económica y financiera de la planta Waste to Energy, con el fin de evaluar su viabilidad futura y facilitar la toma de decisiones.

1.3 Alcance del documento

La interacción entre las soluciones de gestión de residuos y las tecnologías de producción de energía a partir de residuos puede variar significativamente, ya que depende de múltiples factores. Diferentes países en todo el mundo han elegido adoptar diferentes estrategias, dependiendo de los criterios y limitaciones técnicas, sociales, económicas y ambientales. Por esta razón, en el capítulo 2 se presenta un breve acercamiento a las razones por las cuales es necesaria una gestión sostenible de los residuos sólidos municipales, así como el estado actual de la gestión global de RSM (sección 2.3), a fin de comprender cuáles son los modelos de administración y gestión que se están empleando actualmente, los cuales permitirán introducir en una sección posterior la relación entre la recuperación de materiales (reciclaje) y la recuperación de energía a partir de los residuos. Adicionalmente, el capítulo 2 presenta una revisión del estado del arte sobre las tecnologías WTE al igual que la implementación de modelos mediante el software de simulación Aspen Plus a nivel mundial.

En el capítulo 3 se presenta la selección de tecnología y simulación del proceso WTE para el AMVA. Con la ayuda del capítulo 3, se presenta posteriormente el capítulo 4, el cual contiene los resultados del estudio de prefactibilidad, tales como, análisis de localización, evaluación financiera y modelo financiero. Por último, en el capítulo 5 se presentan el sumario, conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros.

2 Estado del arte y antecedentes

2.1 Tecnologías Waste to Energy

El aprovechamiento de la energía de los residuos se puede obtener mediante diferentes tecnologías, las cuales serán factibles en mayor o menor medida dependiendo de diferentes parámetros como: el tipo y la composición de los residuos, su poder calorífico y la forma de energía final deseada (calor, electricidad, compuestos químicos).

En la Figura 3 se puede apreciar una lista con las principales tecnologías WTE comerciales [20].

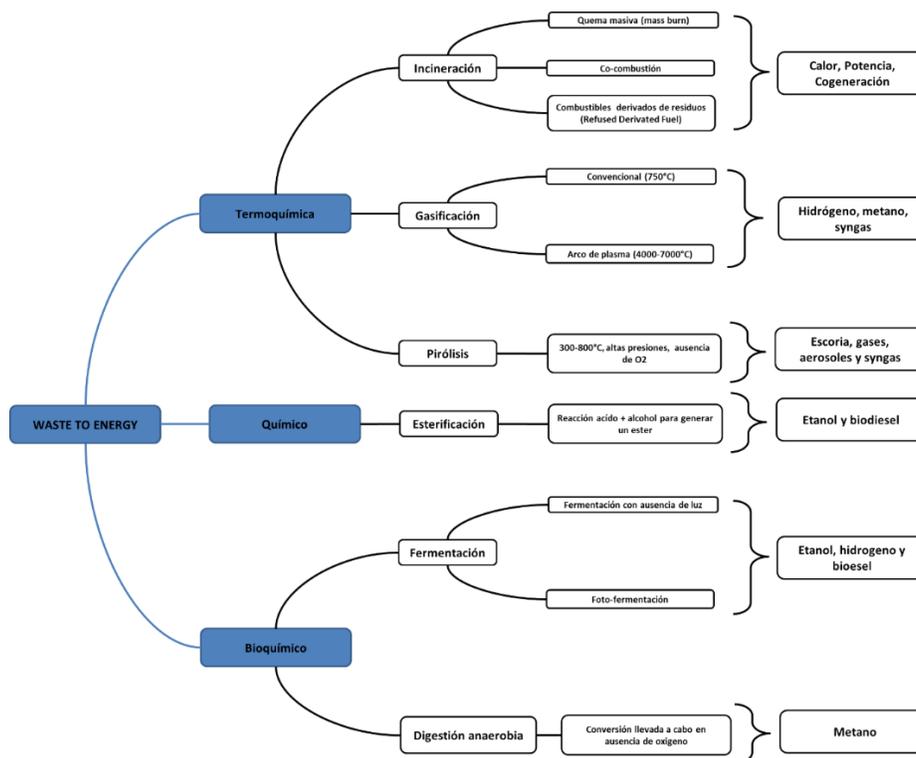


Figura 3. Principales tecnologías Waste to Energy comerciales, adaptado de [20].

- Tecnologías de conversión termoquímica:** Las tecnologías de conversión termoquímica se utilizan para recuperar energía de los RSM mediante el uso de altas temperaturas. La conversión termoquímica incluye la combustión o incineración, gasificación y el pirólisis. La principal diferencia entre estas tecnologías es la cantidad de exceso de aire y temperatura, los cuales generan como productos finales dióxido de carbono (CO₂), agua, metano y/o hidrogeno,

o productos intermedios útiles, como el monóxido de carbono. A continuación, se realiza una descripción de las principales tecnologías termoquímicas comerciales.

Incineración

La incineración es una técnica aplicada para lograr la oxidación completa de los componentes combustibles de los residuos mediante un horno a altas temperaturas entre 750 y 1,100°C [21]. El objetivo de esta tecnología es disminuir el peso y el volumen de los RSM, al igual que obtener calor y energía como se muestra esquemáticamente en la Figura 4 [22].



Figura 4. Esquema proceso de incineración, adaptado de [22]

De acuerdo con Kalogirou [22], la tecnología de incineración es capaz de reducir casi el 70% de la masa total de residuos y el 90% del volumen total. La principal importancia de la incineración es la producción de calor y vapor. De acuerdo con Liu & Wang [23] la eficiencia para la generación de calor, la cogeneración (vapor y electricidad) y la electricidad pura varía entre 80%, 20-30% y 20% respectivamente

Pirólisis

La pirólisis es un proceso de descomposición termoquímica en el cual se produce la descomposición del residuo en ausencia de oxígeno en el rango de temperatura de 300-800°C [24], convirtiendo los RSM en gases (gas de síntesis), líquido (alquitrán), productos sólidos (carbón) y cenizas como producto indeseable. En la Figura 5 se puede observar un diagrama esquemático del proceso de pirólisis.

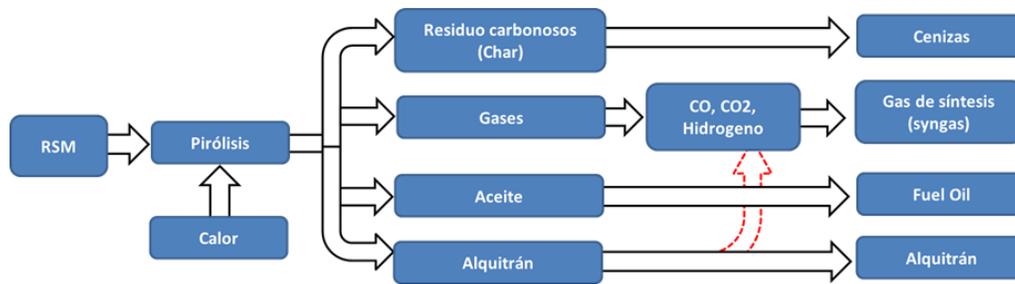


Figura 5. Diagrama esquemático del proceso de pirólisis.

Cuando se transforman los RSM a energía mediante un proceso de pirólisis, existen numerosos inconvenientes, por ejemplo: la contaminación del aire debido a compuestos como HCl, H₂S, NH₃, SO_x y NO_x [25].

Las principales ventajas de la pirólisis son la producción de aceites líquidos como un producto primario con un alto poder calorífico (38 MJ / kg) a partir de residuos carbonosos [24] y la reducción del volumen de residuos [26].

Gasificación

La gasificación de residuos sólidos es el proceso mediante el cual se presenta la oxidación parcial del combustible residual (RSM) en presencia de un oxidante en menor cantidad que la requerida para la combustión estequiométrica [27]. El proceso de gasificación descompone los residuos sólidos en subproductos, principalmente en una mezcla de CO, H₂ y CO₂. [27].

El gas producido puede usarse para diversas aplicaciones después del proceso de limpieza del gas, una vez que se limpia el gas de gas de síntesis, puede usarse para generar combustibles de alta calidad, productos químicos o gas natural sintético (SNG); se puede utilizar en turbinas de gas y/o motores de combustión interna más eficientes o se puede quemar en un quemador convencional que esté conectado a una caldera y a una turbina de vapor [27], ver Figura 6.

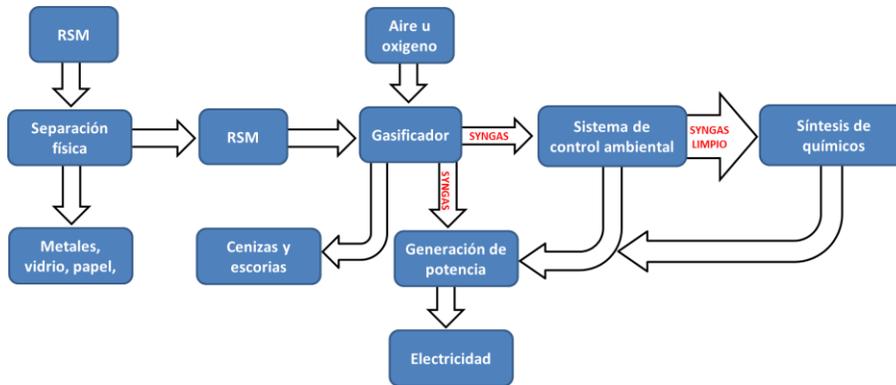


Figura 6. Diagrama esquemático proceso de gasificación.

- **Tecnologías de conversión bioquímicas:** Las tecnologías de conversión bioquímicas utilizan la capacidad de algunos microorganismos (principalmente bacterias y enzimas) para transformar las fuentes de carbono y otros elementos que se encuentran en los residuos, los principales procesos usados en las tecnologías de conversión bioquímica son: la digestión anaerobia y la fermentación; sin embargo, debido a que el enfoque de este estudio son las tecnologías térmicas, no se entrará a profundizar sobre estos procesos y tecnologías.
- **Tecnología de tratamiento químico:** La tecnología de tratamiento químico corresponde al proceso de esterificación, el cual implica la reacción de un triglicérido (grasa/aceite) con un alcohol en presencia de un catalizador alcalino. El alcohol reacciona con los ácidos grasos para formar biodiesel y glicerol, este último utilizado en las industrias cosmética, farmacéutica y alimenticia. Dado que el enfoque de este estudio son las tecnologías térmicas, no se entrará a profundizar sobre estos procesos y tecnologías.

2.2 Tecnologías de tratamiento térmico

Según un estudio realizado en el año 2012 por la International Solid Waste Association [28], Europa cuenta actualmente con 455 plantas Waste to Energy, de las cuales más de un 90% son de características térmicas, mientras que Estados Unidos cuentan con cerca de 75 plantas Waste to Energy, tal como se observa en la Figura 7.

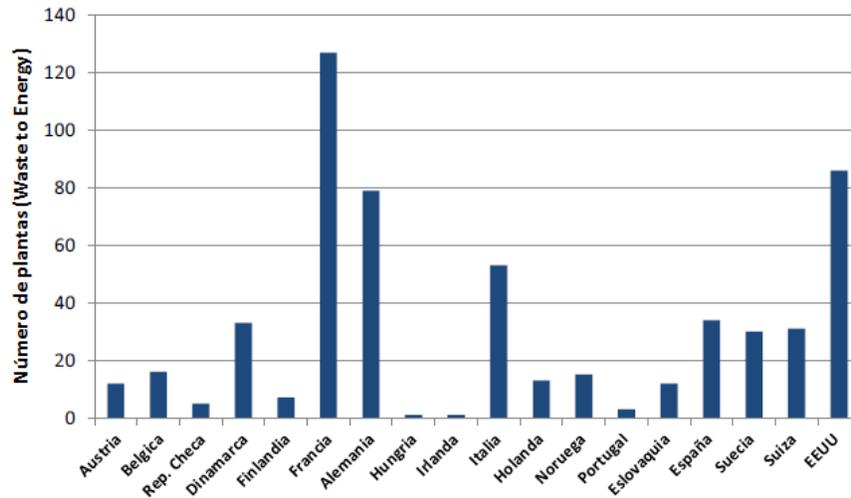


Figura 7. Número de plantas Waste to Energy por país, adaptada de [28].

En la Figura 8, se puede observar la capacidad promedio de plantas Waste to Energy, ubicadas en Europa y Estados Unidos.

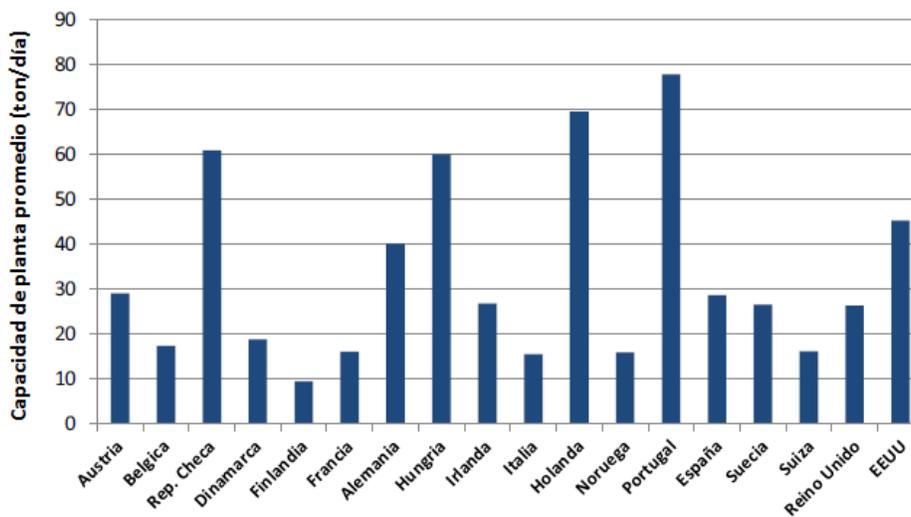


Figura 8. Capacidad de procesamiento promedio plantas WTE, adaptada de [28]

Una planta típica Waste to Energy de características térmicas, está conformada por los siguientes sistemas:

1. Búnker de almacenamiento de residuos
2. Sistema de tratamiento térmico (incinerador, gasificador o pirolizador)
3. Parrilla para remoción de cenizas
4. Sistema generador de vapor

5. Economizador (recuperador de calor)
6. Sistema de desnitrificación (lavador de gases)
7. Sistema de control de material particulado (filtros de mangas y/o precipitador electrostático)
8. Sistema de ventilación y chimenea
9. Turbogenerador de vapor
10. Sistema de condensación y recuperación de agua
11. Sistema de recuperación de metales y subproductos
12. Sistema de control

El diagrama esquemático de una planta típica Waste to Energy de características térmicas se puede observarse en la Figura 9.

Tabla 3. Principales tecnologías para plantas Waste to Energy de características térmicas a nivel mundial, adaptada de [6]

Tecnología térmica (WTE)	Materia Prima	Producto energético	Capacidad instalada (Ton/año)	Lugar de operación
Combustión en parrilla	RSM	Vapor HP	<168 M	Asia, Europa, América
Combustión de horno rotatorio	RSM	Vapor HP	>2 M	Japón, EE.UU., U.E.
Energy Process (SEMASS)	RSM triturado	Vapor HP	>1 M	EE.UU.
RDF para la combustión de parrilla	RSM triturado y clasificado	Vapor HP	>5 M	EE.UU., U.E
Lecho fluidizado circulante	RSM o RDF triturado	Vapor HP	>11 M	China, Europa
Lecho fluidizado Ebara	RSM o RDF triturado	Vapor HP	>0.8 M	Japón, Portugal
Lecho fluidizado burbujeante	RSM o RDF triturado	Vapor HP	>0.2 M	EE.UU.
Tratamiento biomecánico (TMB o TBM)	RSM triturado y bioreaccionado	RDF para los hornos de cemento	>5 M	U.E.
Proceso de fundición directa	RDF	Vapor HP	>0.9 M	Japón
Gasificación Thermostelect	RSM tal como se reciben	Gas de síntesis (CO, H ₂ , CO ₂)	>0.8 M	Japón
Gasificación asistida por plasma	RSM triturado	Gas de síntesis (CO, H ₂ , CO ₂)	>0.2 M	Canadá, Japón, Francia

*HP: High Pressure

**M: Millones

A continuación, se realiza una descripción de algunas de las tecnologías WTE térmicas más utilizadas

- **Combustión**

Combustión en parrilla

De acuerdo con Wood et al [30], la tecnología combustión en parrilla móvil (Moving grate) ha sido el "caballo de batalla" del tratamiento térmico de residuos con más de 1,000 plantas operativas en todo el mundo. En la Figura 10 se muestra una representación esquemática de una planta de combustión de parrilla móvil.

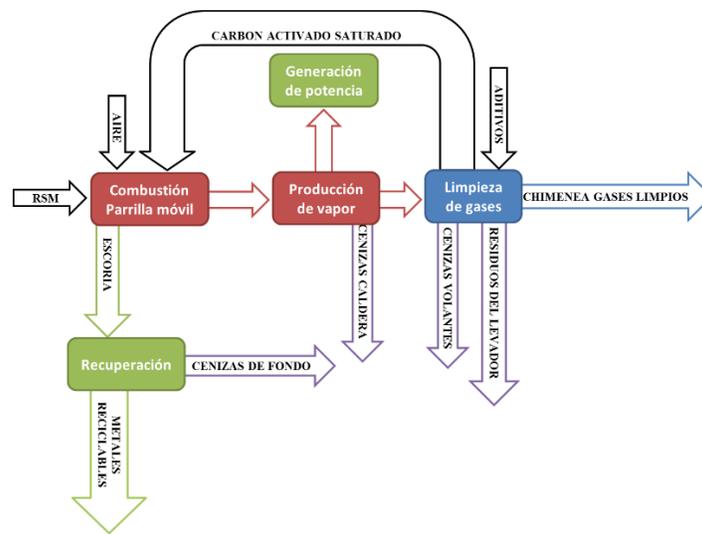


Figura 10. Representación esquemática de una planta de combustión de parrilla móvil, adaptada de [30].

El mecanismo de parrilla móvil mueve el residuo sólido quemándose desde la entrada hasta la salida. El aire de combustión primario se inyecta por debajo de la parrilla y pasa por debajo de los sólidos en combustión y fluye hasta la zona libre por encima del lecho. Los puertos de inyección de aire secundario y terciario se utilizan para garantizar la combustión completa de los componentes de la fase gaseosa volatilizados a partir de los residuos sólidos [30].

Los gases de combustión calientes que se obtienen pasan a través de una caldera acuotubular de recuperación de calor, en la cual se genera vapor de alta o media presión que posteriormente impulsa el generador de la turbina para generar electricidad. En algunos sistemas el calor de baja presión que sale de la turbina es utilizado como suministro de calor

para otras aplicaciones [6]. En la Figura 11 se puede observar el esquema de una planta Waste to Energy de parrilla móvil, ubicada en Reino Unido (Edinburgh) y fabricada por Hitachi Zosen Inova.

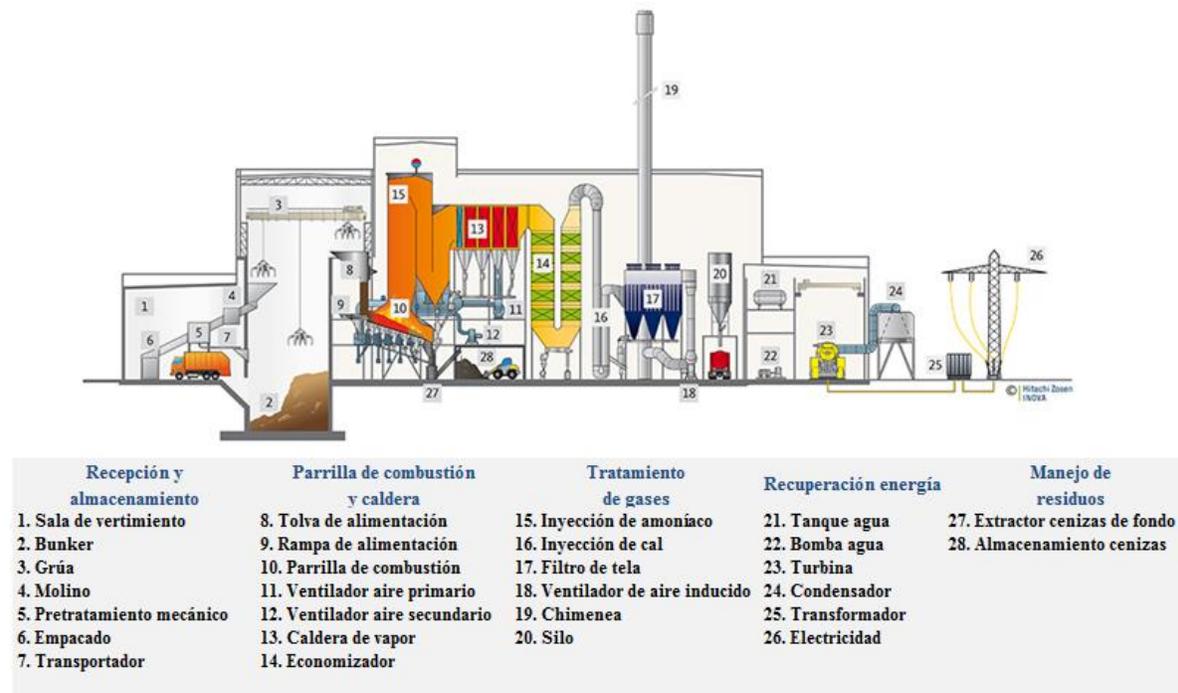


Figura 11. Diagrama planta parrilla móvil, Edinburgh Reino Unido, adaptada de [31]

De acuerdo con [6], las instalaciones WTE más eficientes son co-generadoras de electricidad, produciendo más de 0.6 MWh de electricidad y más de 0.5 MWh de calor por tonelada de RSM procesados.

Combustión en lecho fluidizado

La tecnología para la combustión en lecho fluidizado (FB) es un proceso bien establecido y probado para la conversión de residuos en energía. La tecnología fue desarrollada originalmente para la generación de energía a partir de la combustión de carbón, pero se ha aplicado a una gama mucho más amplia de combustibles en los últimos años. Estos incluyen combustibles de biomasa y residuos sólidos municipales [30].

En la Figura 12 se puede observar un esquema convencional de un proceso de incineración mediante lecho fluidizado.

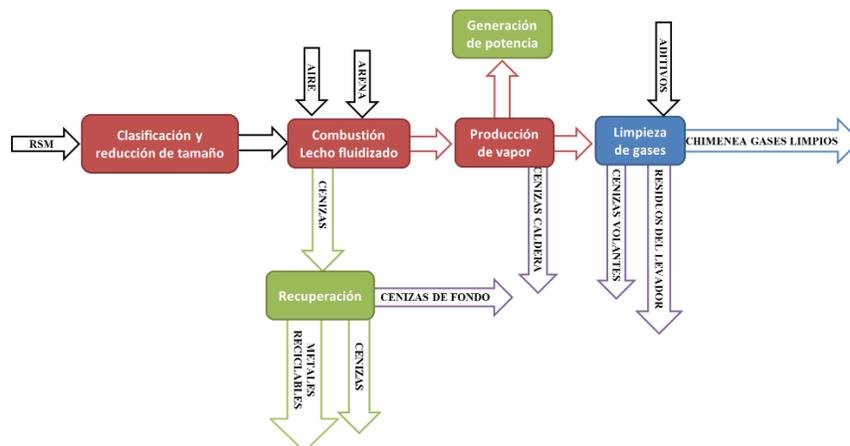


Figura 12. Esquema proceso de incineración mediante lecho fluidizado, adaptado de [30]

De acuerdo con [32], la aplicación más frecuente de incineración en lecho fluidizado corresponde a la tecnología CFB. En la Figura 13, se puede observar un diagrama esquemático de un incinerador de lecho fluidizado circulante CFB

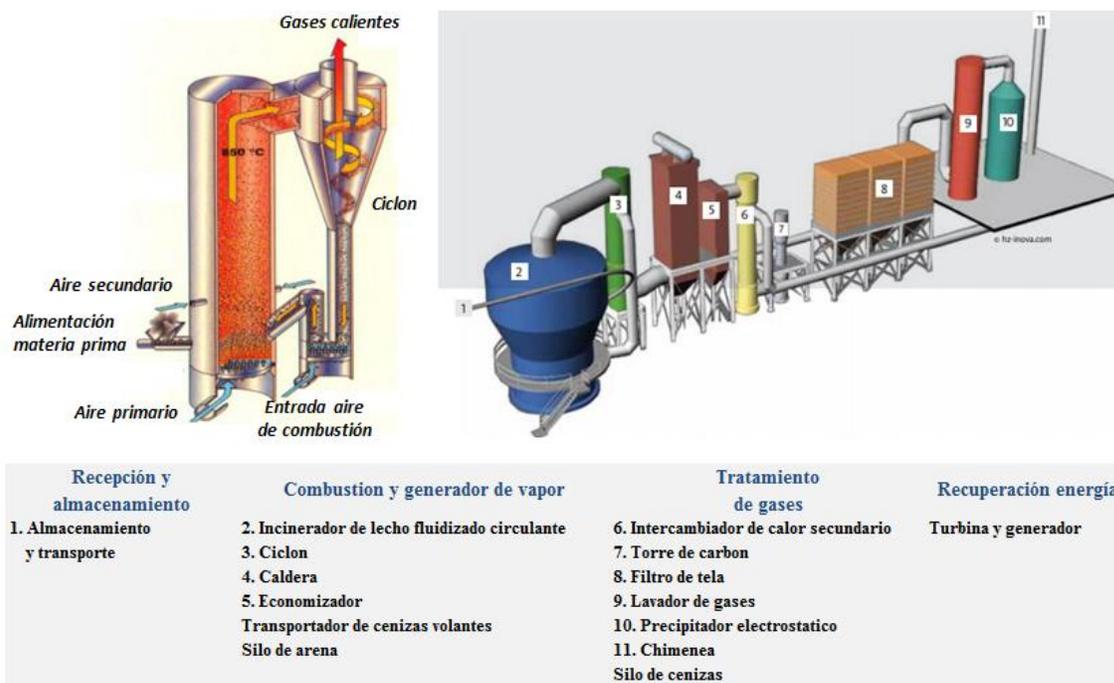


Figura 13. Esquema de un incinerador CFB, adaptado de [30]

De acuerdo con el reporte entregado por la Asociación Internacional de Residuos Sólidos (ISWA, por su sigla en inglés), Europa cuenta con cerca de 33 plantas WTE de lecho

fluidizado con una capacidad instalado de 370 toneladas/h de RSM, tal como se puede observar en la Tabla 4.

Tabla 4. Plantas operativas WTE de lecho fluidizado en Europa, adaptado de [28]

País	Localización	Capacidad (Ton/h)	Tipo	Fabricante
Austria	Lenzing	37.5	FB	Austrian Energy
Austria	Linz	26	FB	Strabag Energietechnik
Austria	Niklasdorf	12	FB	
Francia	Guerville	3.3	FB	TMC
Francia	Sausheim	11.5	FB	
Francia	Sausheim	11.5	FB	
Alemania	Stuttgart	3	FB	Raschka
Alemania	Stuttgart	4	FB	Raschka
Italia	Bergamo	9	FB	CCT/EPI
Italia	Gioia Tauro	8.64	FB	Kvaerner
Italia	Gioia Tauro	8.64	FB	Kvaerner
Italia	Macomer	3	FB	CTIP
Italia	Macomer	3	FB	Termomeccanica
Italia	Ravenna	6.5	FB	EPI
España	Madrid	9.17	FB	Ebara
España	Madrid	9.17	FB	Ebara
España	Madrid	9.17	FB	Ebara
España	San Román	23	FB	
España	San Román	23	FB	
Suecia	Bollnäs	10.1	FB	Generator
Suecia	Bollnäs	10.1	FB	Generator
Suecia	Lidköping	6	FB	Kvaerner
Suecia	Lidköping	6	FB	Kvaerner
Suecia	Norrköping	24	CFB	Kvaerner Power
Suecia	Norrköping	27	CFB	Foster Wheeler
Suecia	Sundsvall	6	CFB	Götaverket
Suecia	Västervik	4	FB	Generator (Metso)
Suecia	Västervik	4	FB	Generator (Metso)
Reino Unido	Wolverhampton	8	FB	Kvaerner
Reino Unido	Wolverhampton	8	FB	Kvaerner

De acuerdo con el más reciente reporte emitido por el Consejo de Recuperación de la Energía de Estados Unidos [33], se tienen actualmente 75 instalaciones WTE, de las 75 plantas WTE,

58 son de tecnología de incineración de parrilla (mass burn), 13 son de tecnología RDF procesadas mediante parrilla y 4 son de tecnología modular.

Combustión de combustible derivado de residuos (RDF)

De acuerdo con [12], el combustible derivado de los residuos (RDF) se refiere a la fracción segregada y altamente calórica de los RSM, los desechos comerciales o industriales. En la Figura 14 se puede observar un esquema de producción de RDF a partir de residuos residenciales

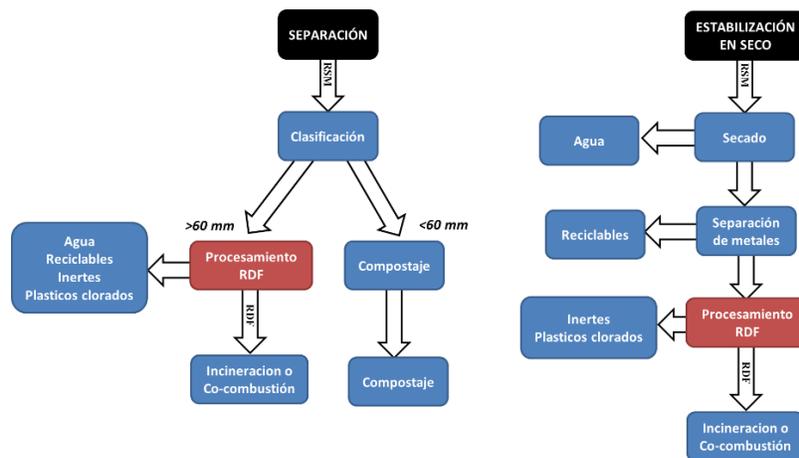


Figura 14. Esquema de producción de RDF a partir de residuos residenciales, adaptado de [12]

De acuerdo con [6] en los EE.UU hay 12 instalaciones WTE RDF, con capacidades que van de 360 a 2,700 toneladas por día (es decir, el 20% de la capacidad de EE.UU. en WTE).

La planta WTE de SEMASS en Rochester Massachusetts, es uno de los mejores ejemplos de la aplicación de la tecnología RDF [6]. De manera esquemática se puede observar la planta de SEMASS en la Figura 15

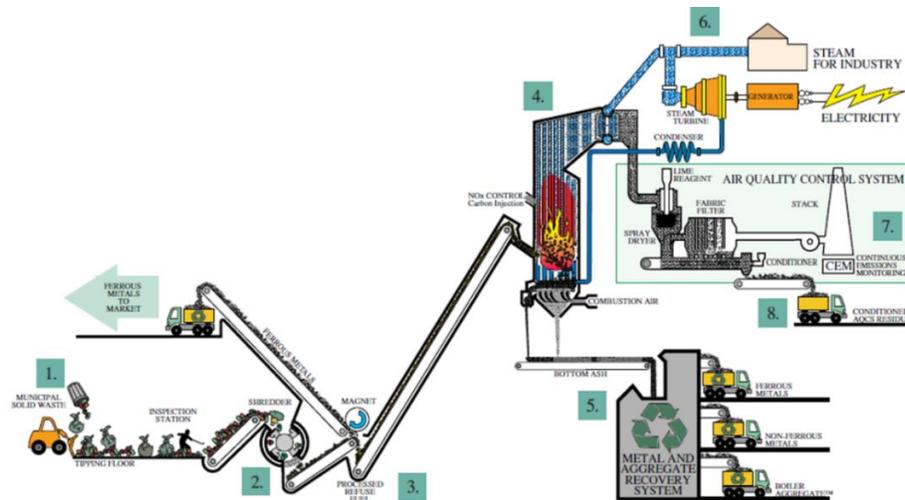


Figura 15. Proceso esquemático de la planta SEMASS, Rochester, adaptado de [34] Según (Themelis et al., 2016), “casi todas las plantas WTE/RDF de gran tamaño están en EE.UU una de ellas, de 1,800 toneladas/día de capacidad fue construida cerca de Palm Beach, Florida, cuando el condado estaba generando 2,900 toneladas/día de RSM. En el intervalo de veinte años, la generación de residuos aumentó a 5,900 toneladas/día y el condado decidió construir una segunda planta WTE de 3,000 toneladas/día de capacidad. Es interesante que la nueva planta será una instalación de incineración mediante parrilla (mass burn), ya que será menos costosa de construir y operar. Lo mismo ocurrió en Honolulu, Hawaii, donde se eligió la combustión en parrilla para una expansión de 700 toneladas/día de una planta WTE que es del tipo RDF”

- **Simulación de modelos térmicos WTE en Aspen Plus**

Como ya se definió y se justificó previamente, la tecnología más apropiada para realizar el aprovechamiento térmico de los RSM del AMVA, corresponde a la tecnología de incineración de parrilla. Estos procesos de aprovechamiento de residuos han sido simulados mediante el software Aspen Plus y publicados en diversos artículos de investigación.

Varios autores han desarrollado modelos para simular el proceso de aprovechamiento térmico de los RSM. Cimini & Prisciandaro [35] modelaron una planta WTE para la producción de energía eléctrica y térmica a partir del tratamiento térmico de RSM, con el objetivo de realizar un estudio sobre la aplicabilidad de este software en la simulación de un proceso de incineración. El modelo fue desarrollado para analizar y cuantificar los beneficios

de la utilización térmica del combustible derivado de residuos (RDF), enfocado en el rendimiento de la zona de recuperación de energía. Los autores evaluaron la cogeneración a diferentes condiciones de carga y valores de PCI del RDF, estudiaron la temperatura y la presión de salida de la turbina con el fin de evaluar las condiciones termodinámicas para el ciclo de cogeneración y compararon la producción de vapor en la zona de recuperación de energía y la potencia neta de salida de la turbina obtenidos mediante el modelo con los datos reales de la planta de incineración WTE de la ciudad de Ravenna, Italia. Los autores concluyeron que el rendimiento global de la planta es afectado fuertemente por el flujo de alimentación de RDF y su PCI, el cual incide fuertemente en la potencia generada y puede ser mejorado por la adición de carbón molido, el cual mejora el PCI del material alimentado. Adicionalmente, concluyeron que el modelo propuesto puede ser un instrumento confiable para ser usado tanto en el diseño como en la planificación de nuevas plantas y en el control y modernización de las plantas existentes.

Jannelli & Minutillo [36] también simularon el proceso WTE de incineración para RDF, pero enfocados principalmente en el sistema de depuración de gases. El modelo de simulación fue realizado a partir de los datos reales de diseño y funcionamiento de una planta WTE construida por Lurgi Energie y operada en Berlin, Alemania. [36] simularon el funcionamiento de la sección de tratamiento de gases de combustión y la sección de combustión. La zona de combustión incluyó el incinerador de parrilla y la cámara de postcombustión, mientras que la sección de limpieza incluyó el proceso de reducción de NOx (inyección de urea) y el lavado de SO₂ y HCl. Los autores concluyeron que el modelo puede considerarse una herramienta útil ya que permitió la verificación de la contaminación ambiental de una planta de incineración en condiciones nominales de operación y porque podría permitir el pronóstico de las emisiones cuando la composición de los desechos u otros parámetros son variables.

Trop, & Goricanec [37] Simularon mediante Aspen Plus el aprovechamiento térmico del lodo obtenido en plantas de tratamiento de aguas municipales (el cual tiene un poder calorífico similar al carbón mineral), mediante plantas de incineración o procesos de co-combustión en centrales térmicas, con el fin de determinar qué porcentaje puede ser incorporado en los procesos de co-combustión y el efecto sobre la concentración de metales pesados en los gases

de combustión. Los autores evaluaron la influencia de la fracción de lodo alimentado al proceso de co-combustión y su porcentaje de humedad sobre la generación de energía eléctrica y la composición de los gases de combustión. Adicionalmente, realizaron un análisis económico (Valor Presente Neto) en el cual se estudiaron los costos de inversión y costos operativos en función del flujo de lodo alimentado al proceso de co-combustión; y validaron el modelo usando valores reales obtenidos en plantas térmicas.

Dong, & Yang [38] simularon en Aspen Plus el proceso de co-combustión de los lodos como RSM y concluyeron que usando el calor residual de los gases de combustión como fuente de energía para secar los lodos, se puede mejorar la eficiencia de generación, ya que los gases de combustión a 423 K podrían disminuir el contenido de humedad desde 72% hasta 62%, mejorando la eficiencia de generación y la exergía en un 2% y 0.58%, respectivamente.

Grieco & Poggio [39] estudiaron y simularon el efecto que tienen los diferentes sistemas de limpieza de gases de combustión sobre la eficiencia de generación de energía eléctrica en una planta de incineración de RSM con capacidad de 100.000 ton/año. Grieco & Poggio concluyeron que la diferencia de eficiencia entre la tecnología más ventajosa, que es el tratamiento en seco con NaHCO_3 , y la tecnología menos ventajosa que es el tratamiento semiseco, es de aproximadamente el 0,8%, un simple análisis económico mostró que las pocas ventajas de las tecnologías secas no son significativas si se consideran los costos de los productos químicos y la posterior eliminación de los productos. Finalmente, Urbancl et al concluyen que, desde el punto de vista económico, la co-combustión de biomasa municipal es aceptable e incluso rentable.

Otros autores como Ding et al [40] han simulado y optimizado plantas de incineración WTE existentes mediante Aspen Plus. [40] simularon un nuevo proceso de incineración de RSM denominado incineración de alta intensidad (high-intensity combustión), la cual es una tecnología de oxicomcombustión que puede reducir la generación y emisión de contaminantes, particularmente la emisión de dióxido de carbono, comparado con la tecnología WTE de incineración con aire convencional. Los autores simularon y validaron los resultados obtenidos mediante la planta de incineración ubicada en Shenzhen, China. Posteriormente evaluaron la unidad de separación de aire, el sistema de energía por oxicomcombustión y el sistema de compresión de procesamiento de gases de combustión. Finalmente, Ding et al

concluyeron que la mejor concentración de oxígeno alimentado para la oxidación es del 96%, la tasa de recuperación de dióxido de carbono de todo el sistema es del 96.24% lográndose una emisión de dióxido de carbono cercana a cero. Por otra parte Jana & De [41], realizaron un análisis sobre la eficiencia térmica y la energía requerida para llevar a cabo la captura de CO₂ y sus efectos sobre la eficiencia global de la planta y concluyeron que para plantas con captura de CO₂, el calor obtenido de esta planta se utiliza completamente para el proceso de captura de CO₂, por lo cual la condición operativa se debería decidir de manera flexible dentro de un rango de eficiencia de captura de CO₂ de 0-50%, dependiendo de la necesidad real de la captura de CO₂.

A partir de la literatura consultada, se observa que se han desarrollado diversos estudios en los que se ha simulado el proceso WtE de incineración para evaluar el efecto que tienen algunos parámetros de operación sobre variables como la composición de los gases de combustión, la generación de energía eléctrica, el potencial termodinámico para los ciclos de cogeneración y la eficiencia energética y exergética de la planta, así como estudios en los cuales se desarrollaron modelos que permiten evaluar el potencial de co-incinerar lodos en plantas WtE y centrales térmicas, evaluar el potencial de incorporar carbón pulverizado para mejorar el poder calorífico de los lodos en procesos WtE y evaluar las emisiones generadas en una planta WtE mediante las 4 tecnologías de depuración de gases más utilizadas en la actualidad. Durante la revisión bibliográfica no se evidenció ningún trabajo en Colombia sobre la simulación de una planta WtE de características térmicas mediante Aspen Plus. Por lo cual, en este trabajo se desarrolla un modelo en equilibrio usando software especializado (Aspen Plus), que permite simular la generación de energía eléctrica y térmica a partir de la incineración de los RSM del AMVA.

De esta manera, en el capítulo 3 (sección 3.2.1) se realiza la descripción y validación del modelo de planta WtE mediante incineración de parrilla desarrollado mediante el software Aspen Plus para la obtención de los flujos de materia, energía y potencia que permitan elaborar el posterior análisis económico y financiero y evaluar la prefactibilidad del proyecto.

2.3 Panorama actual de tratamiento de RSM en Colombia y el Valle de Aburrá

En Colombia la administración de los RSM ha mostrado un progresivo avance en torno al control de la contaminación causada por los RSM. De acuerdo con [42], los RSM reciben una disposición adecuada y solo en un bajo porcentaje de los municipios no cuenta con sitios de disposición final adecuados para tal fin.

De acuerdo con Bi, & Moriguichi [43] en Colombia el modelo de desarrollo esta soportado en un modelo económico de producción y consumo lineal, en el cual los bienes producidos son vendidos, consumidos y finalmente desechados como residuos. Este modelo lineal tiene serios problemas de sostenibilidad debido a que las materias primas utilizadas son limitadas y se tiene una creciente demanda de tierra para la disposición final de los residuos.

De acuerdo con la Dirección Nacional de Planeación, Colombia tendrá 64 ciudades con más de 100,000 habitantes en 2,035, en las que habitarán el 83% de la población y 5,1 millones de nuevos hogares, lo cual tendrá asociado un incremento en la generación de RSM. Según cifras reportadas por Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios [3] para el año 2,030 la generación de residuos en las zonas urbanas y rurales podría llegar a 18.74 millones de toneladas anuales, como se puede observar en la Figura 16, de las cuales 14.2 millones de toneladas anuales de residuos deberán ser dispuestos en rellenos sanitarios que no cuentan con la suficiente capacidad para recibirlos, como se observa en la Figura 17. En los diferentes tamaños de rellenos se presentaría un déficit de capacidad instalada, el cual se estima en 10.28 millones de toneladas para el año 2030, presentándose un acumulado para el período 2,015-2,030 de 95.39 millones de toneladas. Estas proyecciones nos llevan a plantearnos seriamente nuevos modelos de gestión y aprovechamiento de los residuos, que permitan hacer frente a esta creciente generación de residuos de una manera sostenible en el tiempo.

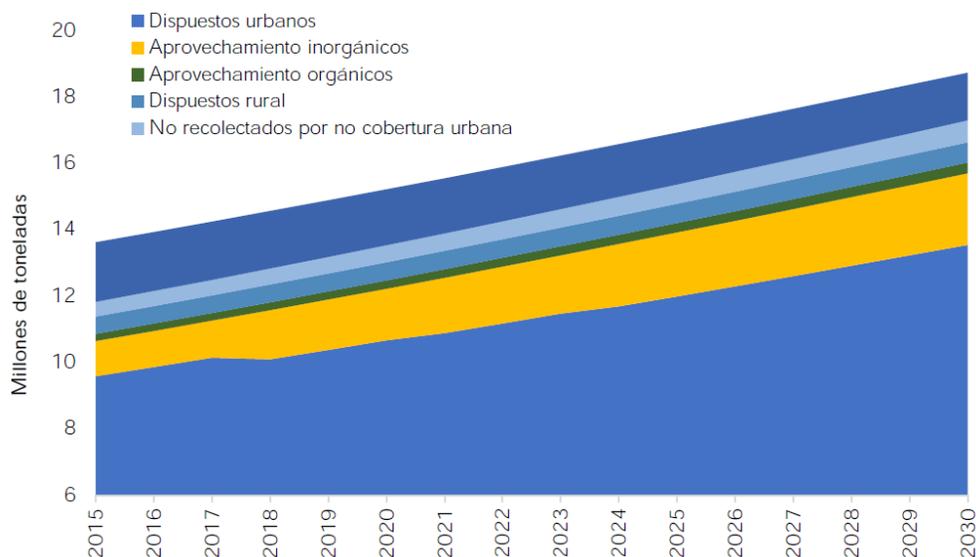


Figura 16. Proyecciones de generación de residuos 2,015-2,030, adaptada de [3]

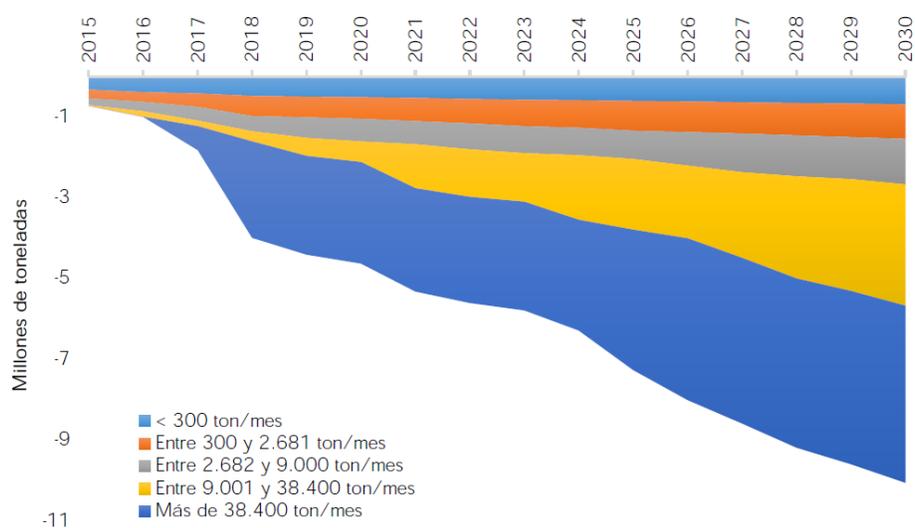


Figura 17. Déficit de capacidad de los rellenos sanitarios 2015-2030, adaptada de [42]

Según cifras entregadas por Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, Colombia cuenta con 227 sistemas de disposición final ubicados a través de todo el territorio nacional (945 municipios), los cuales se distribuyen como se puede observar en la Tabla 5.

Tabla 5. Número de tipos de sistema

Número de tipos de sistema		
Planta de tratamiento	3	0.97%
Celda transitoria	15	4.87%
Celda de contingencia	15	4.87%

Número de tipos de sistema		
Botadero a cielo abierto	101	32.79%
Relleno sanitario	174	56.49%
Total	308	100%

Adicionalmente de las 11,305,133 toneladas anuales que se dispusieron en el país en el año 2019, se distribuyeron según el tipo de sistema de la siguiente manera: el 96.01% fue dispuesto en rellenos sanitarios, 0.1% en plantas de tratamiento, un 0.22% en celdas transitorias, el 1.69% en celdas de contingencia y 1.98% en botaderos a cielo abierto, como se observa en la Figura 18.



Figura 18. Toneladas dispuestas por tipo de sistema, Figura tomada de [3]

De acuerdo con las cifras entregadas por [3], de las 11,305,133 toneladas dispuestas en 2019, cerca del 50% son generadas por tan solo 8 ciudades, tal como se observa en la Tabla 6.

Tabla 6. Toneladas dispuestas anualmente ciudades principales, adaptada de [3]

Ciudades	Ton/año
Bogotá	2,323,678
Cali	756,304
Medellín	659,035
Barranquilla	526,333
Cartagena	454,822
Bucaramanga	200,612
Santa Marta	184,772
Pasto	120,705

Las cifras anteriores dejan ver claramente que Colombia es un país con alta generación de residuos per cápita y un sistema de administración de residuos aún con mucho por madurar, en el cual es poco el aporte del reciclaje y en el cual se opta en un 96,01% por realizar

disposición final a través de rellenos sanitarios, medida de disposición final que no busca solucionar el problema sino mitigarlo y prolongarlo en el tiempo, situación que es preocupante ya que al momento de realizar este estudio, el 19% de los rellenos sanitarios del país tendrían una vida útil vencida y el 20% cuenta con una vida útil menor a 10 años, como se observa en la Tabla 7.

Tabla 7. Número de tipos de sistema, adaptada y ajustada de [3]

Sistema	Cantidad	Porcentaje
Vencida	56	19%
3-10 años	62	20%
Más de 10 años	66	21%
Sin información	124	40%
Total	308	100%

Las cifras anteriores son una muestra clara de que Colombia requiere propuestas que permitan mejorar el sistema de administración de residuos sólidos municipales, es en este punto en el cual, los procesos WTE pueden ayudar a realizar de una manera sostenible la gestión de los residuos en nuestro país, ya que estos ayudarían a prolongar significativamente la vida útil de los rellenos sanitarios y generar una cadena de valor en torno al aprovechamiento energético de los RSM, como ya se hace en otras regiones del mundo.

En los últimos años Colombia ha demostrado una seria preocupación por mitigar los efectos ambientales y un compromiso con la sostenibilidad. En diciembre de 2015, Colombia participó en la XXI reunión de la Conferencia de las Partes, denominada COP 21. En el cual se comprometió a reducir sus emisiones de GEI en un 20%. También se cuenta con los compromisos adquiridos ante la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico), donde se comprometió a establecer una política de gestión integral de residuos que satisfaga objetivos de protección ambiental, manejo de residuos económicamente eficiente y ambientalmente razonables. En esta misma línea de buscar nuevas alternativas que sean ambientalmente más amigables en cuanto al aprovechamiento y manejo de los RSM, la Dirección Nacional de Planeación [42], llevo a cabo un estudio en el cual se evaluaron los costos netos/tonelada para algunas técnicas de manejo de residuos con una capacidad de 30,000 toneladas/mes, tal como se puede observar en la Figura 19.

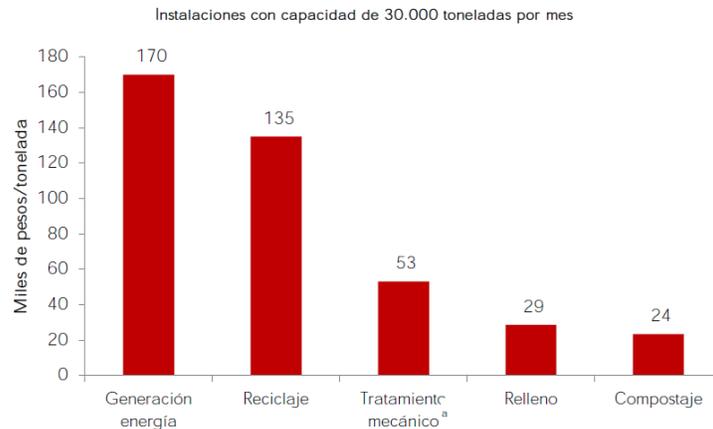


Figura 19. Costo neto por tonelada de diferentes técnicas de tratamiento de RSM, adaptada de [42]

Como se puede observar la técnica de relleno sanitario y compostaje, son las técnicas más económicas; sin embargo, esto no ha sido una limitante para que en el país se hayan desarrollado proyectos que buscan aprovechar los residuos mediante otras técnicas, tal como se puede observar en el mapa de referencia, incluido en el Anexo 1.

De acuerdo con DNP [42] un estudio de 2,015 contratado por el BID señala que es necesario eliminar barreras normativas o implementar mecanismos para permitir que en la tarifa del servicio público de aseo que se cobra a los ciudadanos, se incluya el costo de técnicas que permitan la recuperación de materia prima o energía, tales como las tecnologías WTE, cuando su costo sea superior al de disposición final en relleno sanitario y en tamaños de mercado donde sean viables, tecnología que de acuerdo con [6], es viable en mercados cuya generación de RSM supera los 300,000 toneladas/año.

Finalmente, el CONPES 3874, considera tres metas específicas de esta política para el año 2,030, tal como se puede observar en la Figura 20. Para dar cumplimiento a los objetivos de esta política el Gobierno Nacional financiará el 97.3% del costo total de la política, lo que equivale a 182,698 millones de pesos.

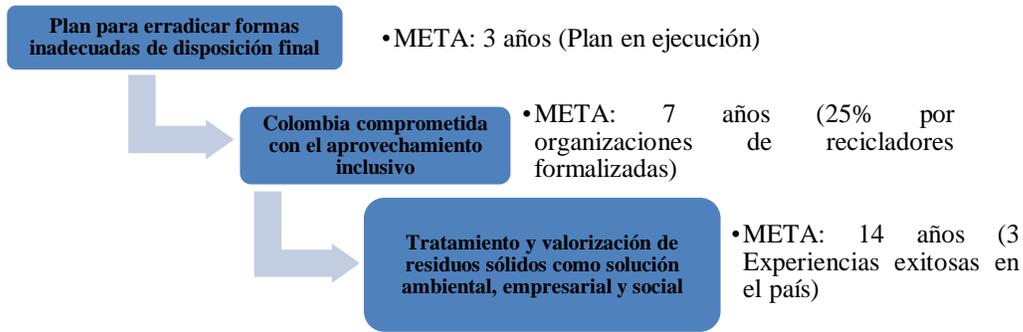


Figura 20. Etapas y metas de la Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos, adaptada de [42]

Panorama actual en el Valle de Aburra

El Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) está integrada por diez municipios de la subregión del Valle de Aburrá. Su ciudad principal es Medellín y los otros miembros son Caldas, La Estrella, Sabaneta, Itagüí, Envigado, Bello, Copacabana, Girardota y Barbosa, tal como se puede observar en la Figura 21.

La población del Valle de Aburrá ascendía a 4,055,296 habitantes en 2020 según datos de la página oficial del AMVA [44], lo cual la convierte en la segunda área metropolitana más poblada de Colombia, solo por detrás del área metropolitana de Bogotá, tal como se observa en la Tabla 8 [44].



Figura 21. Mapa Área Metropolitana del Valle de Aburrá, tomada de [44]

Tabla 8. Información demográfica AMVA.

Municipios	Extensión (km ²)	Habitantes	Densidad (hab/km ²)	Distancia centro de Medellín (km)
Medellín	380.64	2,533,424	6,656	0
Bello	142.36	552,154	3,879	10
Itagüí	21.09	289,994	13,750	11
Envigado	78.78	242,197	3,074	10
Caldas	135	81,762	606	22
Copacabana	70	81,820	1,169	18
La Estrella	35	75,517	2,158	16
Girardota	78	54,439	698	26
Sabaneta	15	87,981	5,865	14
Barbosa	206	54,347	264	42
Total	1,156.18	4,053,635	38,118	—

En la Tabla 9 se puede apreciar la línea base del sistema de gestión de RSM del AMVA, establecida en el PGIRS Regional del AMVA 2017-2030.

Tabla 9. Línea base del sistema de gestión de RSM para el AMVA, adaptada de [44]

COMPONENTE	CANTIDAD
Institucional	
Prestadores de aseo públicos	2
Prestadores de aseo mixtos	8
Suscriptores	1,149,462
Estratos 1,2 y 3	73%
Facturación anual	\$ 202,387,725,414
Generación	
Toneladas/día	3,190
Potencial aprovechable reciclable	30%
Aprovechamiento reciclable, año 2016	15.30%
Potencial aprovechable orgánico	55%
Aprovechamiento orgánico, año 2016	1.90%
Diferencia hacia relleno sanitario (ton/día)	2,643
Producción per cápita total (kg/hab día)	0.83
Producción per cápita residencial (kg/hab día)	0.57
Porcentaje subsector residencial (%)	68.7
Porcentaje subsector no - residencial (%)	31.3
Transporte y transferencia	
Estación de transferencia (ton/día)	670

Cobertura Urbana	98.70%
Cobertura rural	58%
Disposición Final	
Ton/día	2,643
Relleno sanitario regional – La Pradera	1
Municipios atendidos	24
Años de vida útil (Vaso Altair I)	5 años

A continuación, se pueden observar las metas establecidas en el PGIRS Regional 2,017-2,030: [44]

- Máxima cultura de la separación
- Máxima cobertura de separación en la fuente, aprovechamiento y recolección de no aprovechables en zonas de difícil acceso.
- Puesta en marcha de estación de transferencia y transporte férreo de residuos
- Aprovechamiento de residuos orgánicos al 40% en el año 2,030
- Aprovechamiento de residuos reciclables al 30% en el año 2,030
- Un nuevo sitio evaluado y legalizado de disposición final (relleno sanitario) al año 2,025
- Sistema de información para la Gestión Integral de Residuos Sólidos diseñado y puesto en operación en el año 2,019

Como se puede observar no se tienen planes o estrategias regionales que busquen el aprovechamiento térmico de los RSM, sino que, las estrategias planteadas para la gestión integral de los RSM están enfocadas en la separación en la fuente, el reciclaje y la disposición final en rellano sanitario.

2.3.1 Marco normativo

El PGIRS es la carta de navegación para la gestión integral de los residuos sólidos de Medellín y los demás municipios que integran el Valle de Aburrá, articulando la normatividad actual con la realidad de la ciudad. El PGIRS se actualizó en 2,015 por un equipo técnico de la Universidad de Medellín y tiene un plan de acción a 12 años.

El marco normativo actual y vigente más relevante, se puede observar en la Tabla 10.

Tabla 10. Marco normativo para la gestión de RSM, adaptado de [45]

NORMATIVA	DESCRIPCIÓN
Ley 142 de 1,994	Se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios
Dec 2078 de 2,005	Adopta el PGIRS del municipio de Medellín.
Ac 04 de 2,006	Adopta el PGIRS del Valle de Aburrá.
Res 879 de 2,007	Adopta el manual para el manejo integral de residuos del AMVA
Dec 2981 de 2,013	Por el cual se reglamenta el servicio público de Aseo.
Dec 548 de 2,015	Por el cual se adopta el PGIRS del Distrito Capital
Res CRA 720 de 2,015	Se establece el régimen de regulación tarifaria al que deben someterse las personas prestadoras del servicio público de aseo que atiendan en municipios de más de 5,000 suscriptores en áreas urbanas, la metodología que deben utilizar para el cálculo de las tarifas
Res CRA 778 de 2,016	Se adopta el modelo de condiciones uniformes del contrato para la prestación del servicio público de aseo y sus actividades complementarias para las personas prestadoras que atiendan en municipios de más de 5,000 suscriptores en el área urbana

2.3.2 Velocidad de generación de residuos

Las empresas de aseo hacen parte fundamental de la gestión de los residuos sólidos siendo el ente encargado de la recolección de aproximadamente 3,190 toneladas de residuos sólidos por día producidas en el Valle de Aburrá, De acuerdo con las cifras reportadas en el Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) Regional del Valle de Aburrá 2,017- 2,030, las cuales se pueden observar en la Tabla 11 [44].

Tabla 11. Producción de residuos sólidos AMVA año 2,016. Adaptado de [44]

Municipio	Generación, 2,016			Porcentaje
	ton/día	ton/mes	ton/año	
Barbosa	22	681	8,177	0.7%
Girardota	30	905	10,857	0.9%
Copacabana	48	1,473	17,672	1.5%
Bello	258	7,859	94,310	8.1%
Medellín	2,126	64,655	775,860	66.6%
Itagüí	273	8,311	99,734	8.6%
Envigado	230	6,999	83,991	7.2%
Sabaneta	95	2,904	34,846	3.0%

Municipio	Generación, 2,016			Porcentaje
	ton/día	ton/mes	ton/año	
La Estrella	57	1,744	20,929	1.8%
Caldas	49	1,497	17,966	1.5%
AMVA	3,190	97,028	1,164,341	100.0%

De acuerdo con las cifras presentadas en el informe de resultados del PGIRS Regional del AMVA 2017 y las estimaciones realizadas por ACODAL Seccional Noroccidente [44]. Se pueden observar en la Figura 22, las siguientes proyecciones:

- Disposición 1: Proyección de la disposición de RSM si se mantienen las condiciones actuales de generación y aprovechamiento en el AMVA.
- Disposición 2: Proyección de la disposición de RSM y la disminución que se esperaría al implementar las estrategias de aprovechamiento de RSM planteados en el PGIRS Regional 2017- 2030.
- Aprovechamiento: Proyección del comportamiento en el crecimiento sin la implementación de ninguna estrategia o meta regional.
- Aprovechamiento (69%): Proyección que muestra cómo se revertiría la tendencia de aprovechamiento utilizando las estrategias planteadas en el PGIRS Regional.
- Generación: Proyección de la generación de RSM en el AMVA.
- Proyección de la población: Proyección del crecimiento de la población en el AMVA, esta proyección no tiene en cuenta el reciente fenómeno migratorio hacia el AMVA.

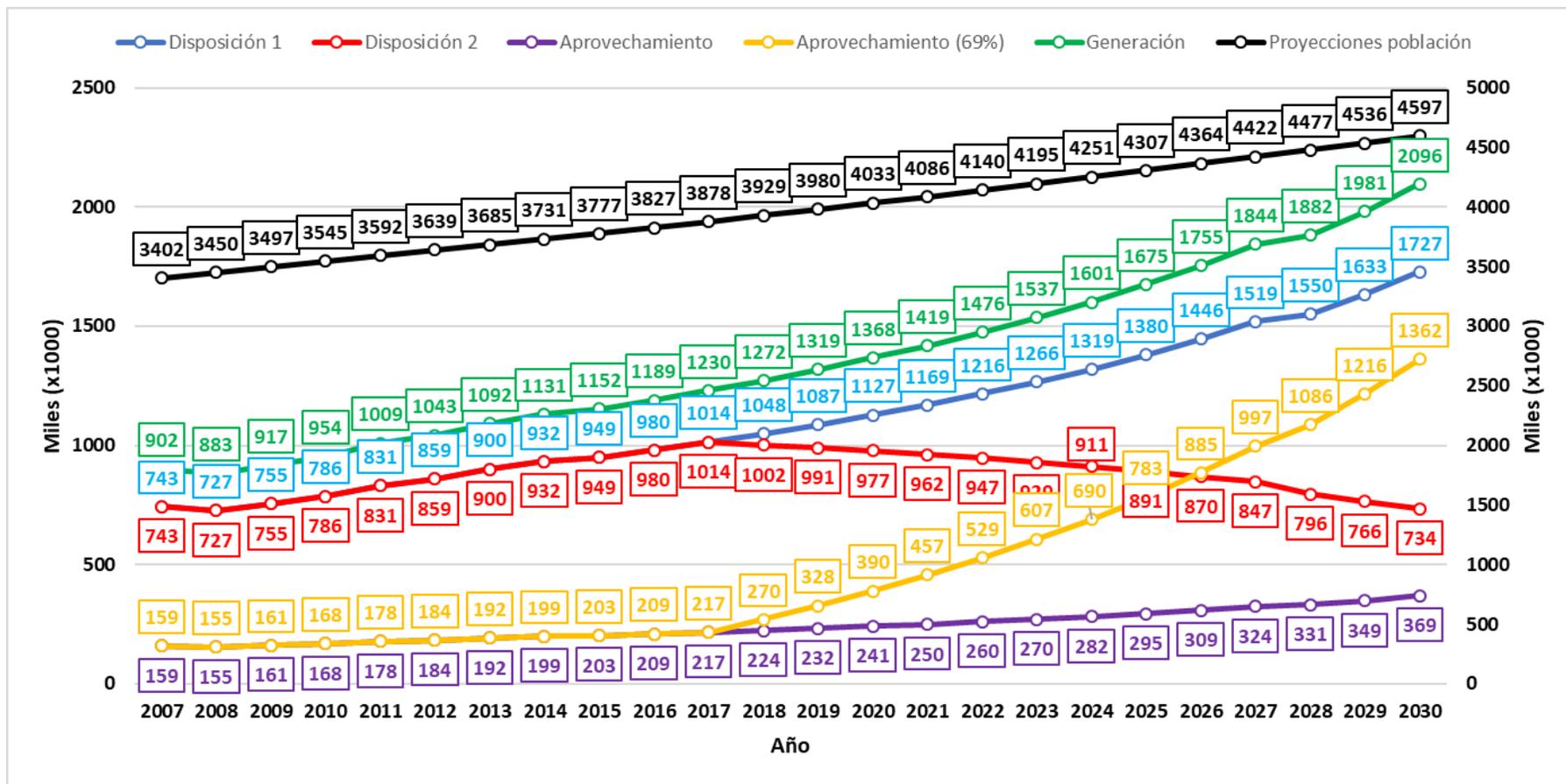


Figura 22. Proyecciones del PGIRS Regional para el AMVA 2017-2030, adaptada de [44].

2.3.3 Caracterización de los RSM en el AMVA

De acuerdo con la información consultada en los reportes del área metropolitana y la información pública reportada por las empresas prestadoras de aseo del Valle de Aburrá, se disponen de dos estudios de caracterización de residuos sólidos, uno realizado en el año 2,015 para los residuos residenciales y el segundo realizado en el año 2,019 para los residuos no residenciales, tal como se puede observar en la Tabla 12, Tabla 13 y Tabla 14.

El análisis fisicoquímico para los RSM residenciales fue realizado con base en la zonificación y los estratos correspondientes en el municipio de Medellín, dicha convención de zonas y estratificación se puede observar en el Anexo 2.

Tabla 12. Composición física de los RSM generados en el sector residencial, adaptada de [46]

Residencial	Corregimientos	Promedio
Componente	%	%
Biodegradables y putrescibles	50.41	55.4
Madera	0.14	0.71
Papel	3.76	3.74
Cartón	2.37	1.79
Plástico	7.73	8.61
Vidrio	2.82	3.65
Metales	1.58	1.36
Textiles	3.77	4.2
Especiales	1.57	0.93
Ordinarios e inertes	23.86	18.45
Peligrosos	1.99	1.16
Total	100	100

Adicionalmente, se reportaron datos de cenizas, carbón oxidable, humedad y nitrógeno total para los residuos residenciales, tal como se puede observar en la Tabla 13.

Tabla 13. Resultados de análisis fisicoquímicos de muestras de residuos sólidos tomadas de los estratos del municipio de Medellín.
Adaptada de [46].

Estrato Análisis Parámetro	1		2			3			4		5		6	Promedio
	Zona		Zona			Zona			Zona		Zona		Zona	
	1	4	1	4	6	1	4	6	4	6	4	6	5	
Cenizas	20.6	20.8	28.7	14.6	15.7	17.7	16.4	23.8	15	7.93	11.8	6.95	5.98	15.8
CO*	35.2	23.2	27.8	16.1	16.9	27.7	21.4	30	45.8	38.2	30	40.5	43.1	30.5
Humedad	73.6	62.7	79.7	64.3	60.7	73.7	73.7	72	73.8	75.2	73.2	69.0	69.6	70.9
N total	4.99	0.9	3.34	1.08	0.74	4.73	1.49	2.16	1.65	1.36	1.33	1.34	0.96	2.0

*Carbono orgánico oxidable

Tabla 14. Composición física de los RSM generados en el sector no residencial, adaptada de [46]

Sector	Biodeg	Papel	Text	Ordinarios	Plásticos	Caucho	Cuero	Cartón
Industrial	12.6	4.17	8.93	35.50	19.23	0.26	0.10	3.65
Centro comercial	25.14	0.02	0.01	48.05	15.84	0.23	0.00	0.80
Oficial	25.94	0.09	0.01	37.15	15.31	0.14	0.00	2.33
I.E	28.17	2.31	0.61	38.16	22.81	0.28	0.00	1.81
Salud	9.3	8.3	2.18	45.46	17.85	0.00	0.00	4.86
Restaurantes	55.16	0.2	0.03	18.91	15.23	0.02	0.00	0.87
Pl. de merc	79.96	0.45	0.38	9.17	7.47	0.00	0.00	0.90
Comercial	12.78	6.31	1.94	33.21	24.51	0.41	0.07	11.34
Promedio	31.13	2.73	1.76	33.20	17.28	0.17	0.02	3.32

La obtención del poder calorífico se puede obtener por medios experimentales (bomba calorimétrica) o teóricos-analíticos. Para el caso puntual de los residuos sólidos municipales, varios autores han desarrollado ecuaciones matemáticas para obtener el PCS o PCI a partir de la composición de los residuos sólidos municipales, en la Tabla 15 se presenta un resumen de las ecuaciones más ampliamente utilizadas.

Tabla 15. Ecuaciones usadas para el cálculo del PCS y PCI en RSM.

Nombre	Referencia	Ecuación
Dulong	*	$PCI = 8.14 * C + 34.4 * \left(H - \left(\frac{O}{8} \right) \right) + 2.22 * S$
Ali Khan y Abu Ghararah	*	$PCS = 0.0535 * (F + 3.6 * CP) + 0.372 * PLR [MJ/kg]$
Ali Khan y Abu Ghararah	*	$PCS = PCS \left[\frac{MJ}{kg} \right] - 0.0244 * (W + 9 * H)$
CEPIS-OPS	**	$PCS_{bh} = \frac{(MO + Papel + Text + Ordin - \%humedad) * 4000}{100} + \frac{(Plasticos + Caucho + cuero) * 9000}{100}$
CEPIS-OPS	**	$PCI = PCS_{bh} - 6 * \%Humedad$
Dulong modificada	***	

* [47]

** [48]

*** [49]

Como resultado del estudio de caracterización realizado en el año 2,019 para los residuos del subsector No Residencial [50], se pueden observar los resultados experimentales (estudio realizado por el GIEM/Grupo de Integridad y Evaluación de Materiales) y los resultados analíticos obtenidos mediante la ecuación de [47] y [48], tal como se puede observar en la Tabla 16 y Tabla 17.

Tabla 16. Resultados Poder Calorífico método experimental y analítico – Sector no residencial, adaptada de [50].

Sector	PCI (kcal/kg) - GIEM	PCSbs (kcal/kg) - KUNITOSHI
Industrial	4,632.66	4,211.28
Cen comercial	4,023	4,374.45
Oficial	5,395	3,917.81
I.E	3,979.5	4,848.77
Salud	4,922	4,216.21
Restaurantes	5,299.5	4,344.40

Sector	PCI (kcal/kg) - GIEM	PCSbs (kcal/kg) - KUNITOSHI
Pl. de merc	5,632	4,271.12
Comercial	4,676	4,419.29
Promedio	4,819.96	4,325.42

Tabla 17. Consolidado de poder calorífico promedio para el subsector No residencial, adaptada de [50].

Metodología	(KUNITOSHI, 1998)		(Ali Khan & Abu Ghararah, 1991)		GIEM (basado en dato experimental)
Resultados	PCSbs (kcal/kg)	PCSbh (kcal/kg)	PCI (kcal/kg)	PCS (kcal/kg)	PCI (kcal/kg)
Promedio sector no residencial	4,325.42	2,025.5	1,680.51	2,231.98	1,597.5

Debido a que en el informe de caracterización de los RSM no se reportó composición de análisis próximo y ultimo y esta información será necesaria para llevar a cabo cálculos y simulaciones posteriores. Se realizó una estimación de esta información utilizando la siguiente información:

- Composición química característica para RSM reportada en la literatura [51]. Ver Tabla 18.
- Ecuación de Dulong modificada, la cual permite calcular el PCS y PCI de RSM a partir de su análisis ultimo.
- Información de humedad e inertes (cenizas) reportado en el estudio de caracterización para los RSM del subsector no-residencial [50].

Tabla 18. Composición química característica para RSM [51].

Análisis	Rango	Promedio
Análisis Próximo (%)		
Humedad	32-77	55.6
Cenizas	2-34	12.3
Volátiles	17-58	32.1
Análisis último (%)		
C	6.5-32.8	17.3
O	4.76-31.1	11.5
H	1.2-4.9	2.6
N	0.14-1.55	0.5

S	0.01-0.51	0.1
Cl	0.04-0.28	0.1
Energía (kcal/kg)		
PCI	390-3,035	1,434

Haciendo uso de la información anterior y utilizando un proceso iterativo para encontrar los porcentajes de C,H,O,N, y S mediante los cuales se obtuviera el PCI reportado en el informe de caracterización para los RSM no-residenciales del AMVA, se calculó la información del análisis próximo y último, tal como se puede observar en la Tabla 19.

Tabla 19. Resultados análisis próximo y ultimo RSM no-residenciales AMVA mediante calculo propio.

Tipo de residuos Análisis	No-Residencial		Residencial
	GIEM	KUNITOSHI	Estudio 2015
Análisis Próximo (%)			
Humedad	57.5	57.5	70.86
Cenizas	3.0	6.4	15.8
Carbono fijo	4.7	4.3	1.57
Volátiles	34.8	31.8	11.71
Análisis último (%)			
Carbono	21.30	19.45	7.17
Hidrogeno	3.20	2.92	1.08
Oxigeno	14.16	12.93	4.76
Nitrógeno	0.62	0.56	0.21
Azufre	0.12	0.11	0.04
Cloro	0.12	0.11	0.04
Cenizas	2.98	6.41	15.8
Energía (kcal/kg)			
PCI reportado (kcal/kg)	1,872	1,680.5	
PCI calculado Ec. Dulong modificada	1,872	1,680	408

2.3.4 Transporte, transferencia y disposición final de los RSM en el AMVA

- **Transporte y transferencia**

Las actividades de transporte y transferencia en el AMVA son llevadas a cabo de la siguiente forma:

Zona Norte

Los municipios del norte del AMVA en sus territorios no cuentan con estación de transferencia, pero el operador, es decir INTERASEO S.A E.S. P, posee una estación en el municipio de la Sabaneta, ubicada en la vereda Pan de Azúcar, y quien la ópera es la fundación Codesarrollo, actualmente fundación SOCYA.

INTERASEO S.A. E.S.P. se encarga de definir, de acuerdo con las condiciones diarias de las rutas de operación del servicio, la cantidad de vehículos que se envían a la estación de transferencia (Sabaneta). La estación opera las 24 horas, todos los días de la semana, contando en el momento con 17 empleados y 23 tráiler, en los cuales se transfieren los residuos de 2 vehículos compactadores, contándose con una capacidad de transferencia de residuos de 400 a 450 ton/día aproximadamente [52].

Zona Sur

Hasta el año 2,015, los RSM generados en los municipios del sur del AMVA, eran llevados a la estación de transferencia del municipio de Sabaneta, donde posteriormente eran llevados al relleno sanitario El Guacal, sin embargo, este relleno sanitario fue cerrado en el año 2,015, año desde el cual, los municipios del sur del AMVA, disponen sus RSM en el relleno sanitarios La Pradera, el cual se encuentra a una distancia aproximada de 63 km al centroide del municipio de Sabaneta.

Zona centro (Medellín y sus corregimientos)

En la actualidad el municipio de Medellín y sus 5 corregimientos no cuentan con una estación de transferencia para llevar sus residuos y posteriormente darles disposición final. En la actualidad Emvarias tiene en firme un convenio con la empresa Interaseo, con el fin de trasladar parte de los residuos provenientes de la Ciudad de Medellín a tracto camiones y el transporte de estos residuos hasta el sitio de disposición final en el relleno sanitario La Pradera [53]. En el convenio se contempla la transferencia de lunes a sábado de 120 toneladas de residuos por día [53].

En el año 2,003 y 2,005, Emvarias realizó dos estudios con la firma Integral, denominados “Ingeniería básica de las estaciones de transferencia y de descargue de residuos sólidos y determinación del sistema de transporte hasta el Parque Ambiental La Pradera” y “Estudio

para definir el lote donde se ubicará la estación de transferencia de residuos sólidos de Empresas Varias de Medellín E.S.P”, los cuales tan solo en el año 2018, pudieron ser viabilizados. La estación de transferencias de Emvarias estará ubicada en un predio contiguo a la Terminal de Transportes del Norte, en la actual estación de bomberos de Caribe y de acuerdo con cifras reportadas oficialmente, el proyecto valdrá \$55.000 millones, incluidos predios, equipos y obra civil, comenzó a construirse a finales de 2019 y actualmente se encuentra en desarrollo.

- **Disposición final**

En la actualidad, los RSM generados en el AMVA son dispuestos en el relleno sanitario La Pradera, el cual se encuentra ubicado en el municipio de Don Matías a 57 Kilómetros del casco urbano de Medellín. Este relleno entro en funcionamiento el 6 de julio de 2,003, Allí se disponen los residuos sólidos del AMVA y algunas localidades vecinas (Ver Tabla 20); en promedio ingresan diariamente entre 2,200 – 2,700 ton, aunque existen meses pico que alcanzan hasta las 3,200 ton/día, los residuos se reciben las 24 horas del día de lunes a domingo [52]. En la

Tabla 21 se puede observar una breve ficha técnica del relleno sanitario La Pradera.

Tabla 20.Municipios que disponen en el relleno sanitario La Pradera. Adaptada de [52]

Municipios que disponen RSM en el relleno sanitario La Pradera	
Medellín y corregimientos	Copacabana
Guadalupe	Sabaneta
Barbosa	Fredonia
Heliconia	Salgar
Bello	Girardota
Itagüí	Titiribí
Caldas	Gómez Plata
La Estrella	Venecia
Cisneros	Guarne
El Retiro	Yolombó
Carolina	San Jerónimo
Rionegro	La Ceja

Tabla 21. Ficha técnica relleno sanitario La Pradera. Adaptada de [3]

PARÁMETRO	OBSERVACIÓN
Ubicación	Área rural del municipio de Don Matías en la vereda Pradera
Inicio de Operación	5/6/2003
Permiso Ambiental	Resolución 5288 del 2002
Corporación Autónoma Regional	CORANTIOQUIA
Fecha final de la vida útil	1/9/2030
Operador	EMPRESAS VARIAS DE MEDELLIN S.A. E.S. P.
Num de Municipios Atendidos	24
Cantidad Dispuesta	2643 ton/día
Frente de Trabajo	2600 m ²
Manejo de Gases	Se realiza extracción de gases forzada y quema de metano
Tratamiento de Lixiviados	Retención de líquidos en dos lagunas de estabilización

Capítulo 3

3 Selección de tecnología y simulación del proceso WTE para el AMVA

3.1 Selección de la tecnología

La selección de una correcta alternativa para la tecnología WTE depende de múltiples criterios de selección, tales como, disponibilidad de área, cantidad de residuos y su caracterización o composición, necesidades de energía y precios, disponibilidad de recursos, etc.

Para efectos de este estudio de pre-factibilidad se realizó una evaluación preliminar y cualitativa de las alternativas tecnológicas. Para este propósito se hizo uso de metodología

de análisis FODA y una matriz de criterios de selección, con el fin de determinar que alternativa es más apropiada.

Los criterios definidos para la selección de la tecnología se detallan a continuación:

- **Criterios técnicos**

- Versatilidad de la tecnología para tratar diferentes residuos y variación en su composición
- Requisitos de pretratamiento
- Nivel de requisitos o requerimientos con relación a la gestión de residuos aguas arriba (reciclaje, tratamiento en la fuente, cultura de separación, etc)
- Cantidad de energía que debe recuperarse
- Madurez tecnológica
- Tecnología comercialmente validada (referencias internacionales)
- Riesgos de implementación

- **Criterios ambientales**

- Emisiones atmosféricas generadas
- Generación de residuos (líquidos y sólidos)
- Generación de gases de efecto invernadero

- **Criterios sociales**

- Nivel de aceptación de las comunidades (ciudadanos y entes de control)

- **Criterios financieros**

- Costos de inversión (CAPEX)
- Costos de operación (OPEX)
- Ingresos
- Payback o plazo de recuperación de la inversión

Como se describió en la sección 2.1 del capítulo 2 (Figura 3), las tecnologías WTE comerciales se dividen en tecnologías termoquímicas, químicas y bioquímicas, sin embargo, el objetivo de este estudio de pre-factibilidad está enfocado en revisar alternativas termoquímicas, las cuales son las tecnologías con mayor capacidad de procesamiento, las de

mayor número de plantas instaladas a nivel mundial y las más ampliamente validadas a nivel comercial.

Las tecnologías termoquímicas planteadas como alternativas a ser evaluadas son:

- Incineración
- Gasificación
- Pirólisis
- Plasma

El análisis FODA realizado se puede observar en las Tabla 22, Tabla 23, Tabla 24 y Tabla 25.

- Tecnología 1: Incineración
- Tecnología 2: Gasificación
- Tecnología 3: Pirolisis

Tabla 22. Análisis FODA para las alternativas de tecnologías termoquímicas evaluadas – Criterio técnico.

Tec	Fortalezas	Debilidades	Oportunidades	Amenazas
1	<ul style="list-style-type: none"> - Versatilidad para tratar amplio espectro de residuos, solo se requiere tener control en el nivel de humedad. - Genera grandes cantidades de energía/ton RSM - Tecnología validada comercialmente - Tecnología con la mayor capacidad instalada a nivel mundial - Nivel de conocimiento técnico maduro 	<ul style="list-style-type: none"> - RSM con bajo PCI reducen la eficiencia - Pequeñas cantidades de energía producida en comparación con otras tecnologías 	<ul style="list-style-type: none"> - Podría usarse para el tratamiento de residuos peligrosos - Posibilidad de usar el calor producido (cogeneración) 	<ul style="list-style-type: none"> - Falta de oferta o suministro de RSM - Competencia por los RSM – Industrias intensivas en consumo de energía
2	<ul style="list-style-type: none"> - Versatilidad para tratar amplio espectro de residuos - Genera grandes cantidades de energía/ton RSM - Mayor número de plantas operativas que otras tecnologías no convencionales - Conocimiento técnico cada vez mayor 	<ul style="list-style-type: none"> - No se tiene mucha experiencia a gran escala con el tratamiento de RSM - Problemática en el tratamiento de lodos (residuos del proceso) 	<ul style="list-style-type: none"> - A futuro se espera un mayor desarrollo y facilidad operativa 	<ul style="list-style-type: none"> - Variación en la composición del RSM afecta la eficiencia y las condiciones operativas - Competencia por los RSM – Industrias intensivas en consumo de energía
3	<ul style="list-style-type: none"> - Versatilidad para tratar amplio espectro de residuos - Genera grandes cantidades de energía/ton RSM - Facilidad para tratamiento de residuos especiales (neumáticos) 	<ul style="list-style-type: none"> - Tecnología sin plantas comerciales validadas a gran escala para tratamiento de RSM - Requiere sistema de pre-tratamiento - Problema con residuos de alta humedad - Genera pequeñas cantidades de energía con respecto a las demás - Conocimiento operativo no maduro 	<ul style="list-style-type: none"> - Mayor madurez tecnológica y operativa en el futuro 	<ul style="list-style-type: none"> - Competencia por los RSM – Industrias intensivas en consumo de energía

Tabla 23. Análisis FODA para las alternativas de tecnologías termoquímicas evaluadas – Criterio ambiental

Tec	Fortalezas	Debilidades	Oportunidades	Amenazas
1	<ul style="list-style-type: none"> - Alta madurez de sistemas tratamiento de gases - Reducción de GEI gracias a la generación de energía a través de combustibles no fósiles 	<ul style="list-style-type: none"> - Emisiones de contaminantes a la atmosfera - Generación de aguas residuales 	<ul style="list-style-type: none"> - Disminución de huella del carbono 	<ul style="list-style-type: none"> - Costo operativo por disposición de residuos sólidos

		- Generación de residuos sólidos	cuando se tiene cogeneración
2	- Menor nivel de emisiones comparada con la incineración - Reducción de GEI gracias a la generación de energía a través de combustibles no fósiles	- Generación de residuos sólidos	- Costo operativo por disposición de residuos sólidos
3	- Menor nivel de emisiones comparada con la incineración - Reducción de GEI gracias a la generación de energía a través de combustibles no fósiles	- Generación de residuos sólidos	- Costo operativo por disposición de residuos sólidos

Tabla 24. Análisis FODA para las alternativas de tecnologías termoquímicas evaluadas – Criterio Social

Tec	Fortalezas	Debilidades	Oportunidades	Amenazas
1	- Se está empezando a considerar como una alternativa de tratamiento de RSM en las zonas altamente pobladas	- Percepción negativa de la comunidad a la incineración	- Percepción social internacional cambiando, se está valorando el beneficio ambiental	- El desarrollo de nuevas tecnologías limpias
2	- Se está empezando a considerar como una alternativa de tratamiento de RSM	- Falta de aceptación debido a la falta de madurez tecnológica	- Percepción social internacional cambiando	- Tecnología asociada a nivel social con la incineración
3	- Se está empezando a considerar como una alternativa de tratamiento de RSM	- Falta de aceptación debido a la falta de madurez tecnológica	- Percepción social internacional cambiando	- Tecnología asociada a nivel social con la incineración

Tabla 25. Análisis FODA para las alternativas de tecnologías termoquímicas evaluadas – Criterio Financiero

Tec	Fortalezas	Debilidades	Oportunidades	Amenazas
1	- Menor CAPEX y OPEX con respecto a las demás tecnologías termoquímicas - Posibilidad de comercializar la energía generada	- CAPEX más alto respecto a rellenos sanitarios y procesos biológicos	- La rentabilidad aumenta si la planta está cerca de la generación de RSM - Generación de energía aumenta los ingresos y la viabilidad - Una mayor madurez de las tecnologías WTE puede generar bajas en los costos de inversión a futuro.	- Muy sensible a la oferta de los RSM
2	- Posibilidad de comercializar la energía generada	- CAPEX y OPEX muy altos		- Muy sensible a variación en la

						composición de los RSM	
3	-	Posibilidad de comercializar la energía generada	-	CAPEX y OPEX altos	muy	-	Se desconocen los costos reales de inversión, dado que no se tienen plantas operativas a gran escala

Finalmente, con base en el análisis realizado con la metodología FODA, se definieron los criterios, parámetros y factores de ponderación para realizar la selección de la alternativa más apropiada, tal como se puede observar en la Tabla 28.

Debido a que algunos de los parámetros evaluados tienen una relación directa entre la calificación y el puntaje y otros parámetros tienen una relación indirecta, se utilizó la escala de calificación y puntaje recomendado por [6], tal como se observa en las Tabla 26 y Tabla 27.

Tabla 26. Calificación y puntaje – relación directa (1,2,3,4,10,11)

Calificación	Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto
Puntaje	10	30	50	70	100

Tabla 27. Calificación y puntaje – relación indirecta (5,6,7,8,9,12,13,14,15)

Calificación	Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto
Puntaje	100	70	50	30	10

Con respecto a los parámetros de evaluación y el % de importancia de cada uno de estos parámetros en la evaluación de tecnologías WTE, se tomaron del documento guía para la implementación de tecnologías WTE en Latinoamérica [6] cómo se observa en la Tabla 28.

La calificación se llevó a cabo con base en la información previa sobre el estado del arte, las directrices de la guía de [6] y la experiencia profesional desarrollando proyectos similares en el área térmica de la compañía INDISA y HATCH.

Tabla 28. Matriz de evaluación y selección de alternativas

Criterio	Parámetro	% Importancia	Incineración	Gasificación	Pirólisis
Técnico	1 Versatilidad	5	100	70	70
	2 Capacidad de procesamiento	7.5	100	50	50
	3 Cantidad de energía generada	5	100	70	70
	4 Madurez tecnológica	7.5	100	70	50
	5 Requisitos de pretratamiento	2.5	70	50	30
	6 Capacitación - grado de especialidad	2.5	100	50	50
Ambiental	7 Emisiones generadas	10	30	30	30
	8 Generación de residuos sólidos	7.5	50	50	50
	9 Generación de residuos líquidos	7.5	50	30	30
Social	10 Nivel de aceptación comunidades	5	30	50	50
	11 Nivel de aceptación antes de control	5	50	70	70
Financiero	12 Área requerida	5	30	50	50
	13 Costo de inversión	10	70	50	50
	14 Costo operativo	10	50	30	30
	15 Costos de mantenimiento	5	50	30	10
Resultado ponderado total			59.75	45.5	42.5

Como se puede observar en la tabla anterior, la alternativa que mayor puntaje obtuvo corresponde a la tecnología termoquímica de incineración, por esta razón, los análisis posteriores se realizarán considerando esta alternativa.

3.2 Desarrollo y validación de un modelo de una planta WtE para la incineración de RSM del AMVA.

Tomando como referencia los modelos reportados en la literatura [35], [39], [38], [41], [54], se define el diagrama del proceso para la producción de energía eléctrica y térmica a partir de la incineración mediante parrilla móvil de RSM. Para el proceso seleccionado, se desarrolla un modelo en equilibrio termodinámico con enfoque simplificado mediante el software Aspen Plus, el cual se valida comparando los datos obtenidos en el modelo con respecto a los datos obtenidos por [36] y los datos reales de operación de la Planta WTE construida por Lurgi Energie (Operada en Alemania) reportados en el mismo artículo. A continuación, se describe de manera detallada el proceso, el modelo desarrollado y la estrategia de validación con la cual se verifica el modelo.

3.2.1 Descripción del proceso

El proceso está dividido en 4 etapas principales, combustión de los RSM, post-combustión y reducción de NOx, generación de vapor y potencia y control ambiental.

La primera etapa da inicio en la tolva de alimentación desde la cual se alimenta a la parrilla de combustión. El suministro de aire se utiliza para la combustión estequiométrica y los compartimentos de tiro forzado del sistema de rejilla y el aire secundario, que se mezcla con los gases de combustión para mejorar garantizar el exceso de aire (porcentaje mínimo de O₂ en los gases de escape) y poder cumplir los límites máximos permisibles para emisiones de fuentes fijas, tal como lo establece la resolución 909 del 5 de junio de 2018 [55]

La segunda etapa da inicio en la cámara de post-combustión, en la cual se inyecta el aire secundario con el fin de reducir algunos de los contaminantes generados en la etapa de combustión. En esta etapa de debe garantizar que la temperatura en la cámara de post-combustión este por encima de 950°C como lo exige la normativa [55]. En esta segunda etapa también tiene lugar la eliminación de NOx del gas de combustión, la cual se puede llevar a cabo utilizando dos procesos: reducción catalítica selectiva (SCR) y reducción selectiva no catalítica (SNCR). En el Proceso SNCR, el NOx en el gas de combustión se reduce a N₂ por reacción con urea (CO (NH₂)₂) en solución acuosa a alta temperatura (900-1000°C). El aumento de la temperatura permite que la reacción tenga lugar sin necesidad de usar un

catalizador. La eficiencia del proceso SNCR depende de varios factores, incluida la temperatura, nivel de NOx, reactivo - mezcla de gases de combustión, etc. Se han reportado eficiencias de reducción del 30-70%, pero se pueden obtener eficiencias de hasta el 80%, de acuerdo con Radojevic [56].

La tercera etapa tiene lugar en la zona de caldera, en la cual se aprovechan los gases de combustión a altas temperaturas (800-1500°C) para generar vapor de alta presión. Los gases de combustión que salen de la caldera luego de generar el vapor son aprovechados mediante un economizador, para precalentar el agua que ingresa a la caldera. Posteriormente el vapor pasa a través de la turbina para generar la electricidad que luego es suministrada a la red interconectada nacional. Finalmente, el vapor que sale de la turbina es condensado y almacenado en un tanque de almacenamiento de agua, desde el cual se bombea posteriormente hacia la caldera pasando primero por el economizador.

Por último, se tiene la cuarta etapa, la cual consiste en un proceso final de depuración, en la cual se eliminan de los gases de combustión, contaminantes como HCL, SO2 y material particulado. Los procesos para la depuración de estos gases incluyen equipos de lavado de gases que emplean métodos de absorción (empleando cal o bicarbonato de sodio) y grandes bag-houses donde se retira el material particulado antes de ser enviados a las chimeneas de salida. En algunos procesos también se incluyen procesos para la eliminación de Dioxinas y mercurio usando carbón activado.

3.2.2 Descripción del modelo en Aspen Plus

Para la implementación y simulación del modelo se utilizó el software Aspen Plus. Para el cálculo de propiedades termodinámicas se utilizó el modelo de gas ideal para los gases de combustión dado que el proceso se lleva a cabo a altas temperaturas y bajas presiones, para el caso de la estimación de propiedades para agua y vapor se usó el método de Steam-Tables, definido por defecto en el software para este tipo de sustancias debido a su gran exactitud. Las principales consideraciones del modelo son:

- Proceso en estado estacionario
- Proceso adiabático, sin pérdidas de presión en los equipos ni en las líneas.

- El proceso de incineración (combustión) se modela como un reactor en equilibrio de acuerdo con la minimización de la energía libre de Gibbs.
- La cuarta etapa del proceso, la cual consiste en el sistema de abatimiento de SO_x, HCl y material particulado, no será incluido en este alcance de pre-factibilidad, dado que para el costo de estos tratamientos se hará uso de factores específicos por metro cubico normalizado, reportados en estudios previos.

Etapa de combustión:

Dado que la combustión de los RSM es bastante compleja, el modelo solo estima los pasos principales de la combustión de RSM considerando algunas hipótesis simplificadas. De acuerdo con [57], la combustión de RSM se puede estudiar asumiendo que el mecanismo de reacción ocurre en tres (3) pasos: La de-volatilización, la combustión de los volátiles y la combustión de carbono fijo.

El modelo asume que las tres etapas del mecanismo de combustión ocurren en un reactor R-Gibbs (bloque REACTOR1), el cual calcula las composiciones de las corrientes de salida aplicando la condición termodinámica de que el cambio de energía libre de Gibbs de un sistema reaccionante debe ser mínimo en el estado de equilibrio químico y que el equilibrio de fases se alcanza con un cambio mínimo en el cambio de energía libre de Gibbs entre las fases. De esta forma los posibles productos de reacción son definidos sin necesidad de definir las reacciones estequiométricas [58]. La consideración de equilibrio químico es generalmente adecuada para especies producidas a altas temperaturas durante la combustión [59].

Para el software Aspen Plus, la biomasa (RSM) se considera un compuesto “no convencional”, por lo tanto, para simular el proceso de combustión usando los algoritmos y subrutinas incluidas por defecto en el software, es necesario descomponerla en compuestos reactivos (de acuerdo con su análisis próximo y análisis último) antes de ingresarla al incinerador. Para tal efecto se utiliza un reactor de rendimiento R-YIELD (bloque DECOMP). En la Figura 23 se muestra el modelo utilizado para simular el proceso de incineración. El RSM compuesto por RSM residenciales (corriente RSMRES) y RSM no-residenciales (corriente RSMNR) ingresan a un reactor de rendimiento (bloque DESCOMP), donde se descompone en compuestos reactivos según su composición (análisis próximo y

análisis último, Ver Tabla 19). Estos compuestos reactivos (corriente RSM) pasan al bloque REACTOR1 (reactor R-GIBBS) donde reaccionan con el agente oxidante (corriente AIR1) y generan los gases de combustión producto de la incineración los cuales salen del incinerador por la corriente 2. Para garantizar la conservación de la energía en el proceso, el calor liberado en el bloque DESCOMP (proceso de descomposición del RSM) es llevado al incinerador por la corriente HEAT, adicionalmente, en los incineradores de parrilla móvil se tiene un mecanismo de enfriamiento que aumenta la vida útil del equipo, este calor es representado por la corriente de salida HEATOUT, en algunos procesos este calor es utilizado para generar posteriormente agua caliente y mejorar la eficiencia global del proceso [54].

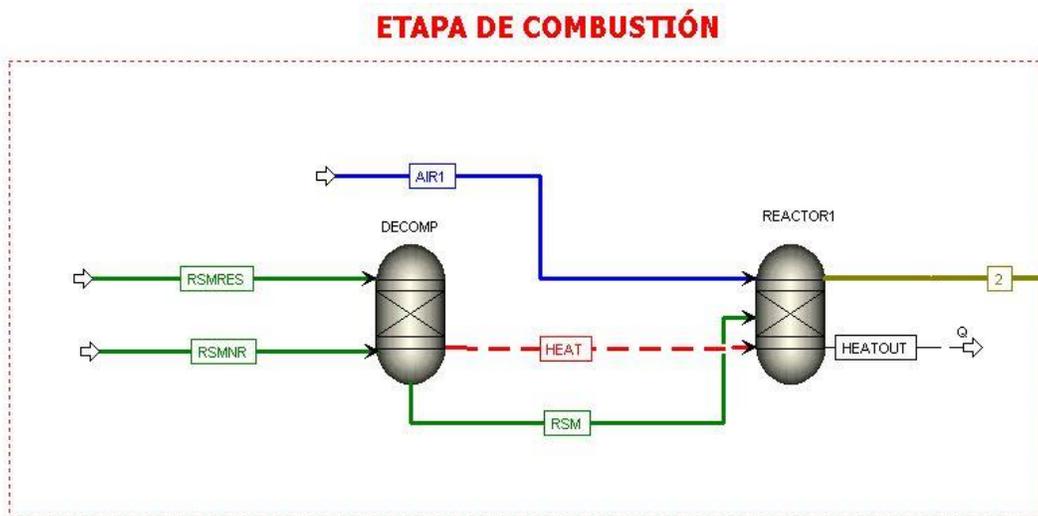


Figura 23. Etapa de incineración – Proceso de combustión en Aspen Plus.

Etapa de postcombustión y reducción de NO_x:

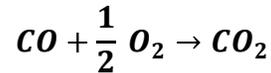
La cámara de postcombustión ha sido modelada usando un reactor CSTR (REACTOR2) en el cual se lleva a cabo la oxidación del monóxido de carbono (CO) y un reactor estequiométrico (SNCR) en el cual se lleva a cabo la reducción del NO_x, como se puede observar en la Figura 24.

- **Oxidación del CO**

En este modelo, se emplean los parámetros cinéticos de oxidación del CO planteado por Bradley [59]. Los gases de combustión (Corriente 2) se mezclan con aire secundario (AIR2)

en la cámara de postcombustión (REACTOR2) donde se produce la oxidación del CO, de acuerdo con la Ecuación 1:

Ecuación 1. Mecanismo de oxidación del CO.



La velocidad de reacción del mecanismo global se puede observar en la Ecuación 2.

Ecuación 2. Cinética de reacción – Oxidación de CO

$$\frac{d[CO]}{dt} = A[CO]^a[H_2O]^b[O_2]^c \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$$

Donde:

- ✓ [CO], [H2O], [O2]: Fracciones molares
- ✓ A: Factor pre-exponencial
- ✓ E_a : Energía de activación
- ✓ a, b, c : Constantes

En la Tabla 29 se pueden observar los parámetros cinéticos de la reacción.

Tabla 29. Parámetros cinéticos de oxidación del CO, adaptada de [54].

Parámetro	T< 1150 K	T>1150 K
A	2.61E+12	6.25E+6
Ea (cal/mol)	45,566	15,968
a	1.0	1.0
b	0.5	0.5
c	0.25	0.25

Luego de la oxidación del CO, los gases de combustión (Corriente GAS2), pasan a un proceso de filtración mecánica (Bloque SEPAR1) en el cual se retiran los inquemados; azufre, carbón y cenizas (Corriente ASH), dando lugar a una corriente sin inquemados (Corriente GAS3), la cual pasa al proceso de reducción de NOx.

✓ **Reducción de NOx:**

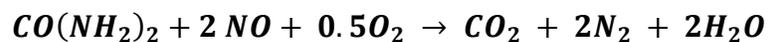
El NOx es térmicamente inestable a altas temperaturas (por encima de 1300 °C); por lo tanto, cuando se inyecta aire secundario en la cámara de postcombustión, debido a una disminución

de temperatura, la reacción de equilibrio se traslada a N₂ y O₂, reduciendo así la concentración de NO_x.

El mecanismo de formación/reducción de NO es bastante complicado y se puede realizar un análisis detallado usando la expresión de Zeldovich para la velocidad de reacción de NO (modelado cinético) y usando códigos CFD. De hecho, este mecanismo depende de muchos parámetros, como la temperatura, la mezcla local de aire/combustible y la geometría del horno. Sin embargo, en este estudio se ha considerado un modelo 0-dimensional de acuerdo con la literatura [60].

La remoción del NO_x es calculado usando un reactor estequiométrico (Bloque SNCR), de acuerdo con la Ecuación 3.

Ecuación 3. Mecánico global reducción de NO_x [60].



En la Figura 24, se puede observar que los gases de combustión (Corriente GAS3) ingresan al reactor estequiométrico (Bloque SNCR) en donde se inyecta aire secundario (Corriente AIR3) y urea en solución acuosa (Corriente UREA+H₂O), dándose de esta manera la reducción del NO_x y generando una corriente con una menor concentración de CO y NO_x (Corriente EXHAUST1) cuyas partes por millón (ppm), deben estar en línea con la normativa ambiental de fuentes fijas.

El porcentaje de urea en solución acuosa se debe manejar entre 10-14%, con el fin de evitar un fenómeno de deslizamiento de la urea, que ocurre si el porcentaje en la solución de agua es demasiado alto [36]. Este porcentaje depende de la concentración de NO_x en los gases de escape (GAS3).

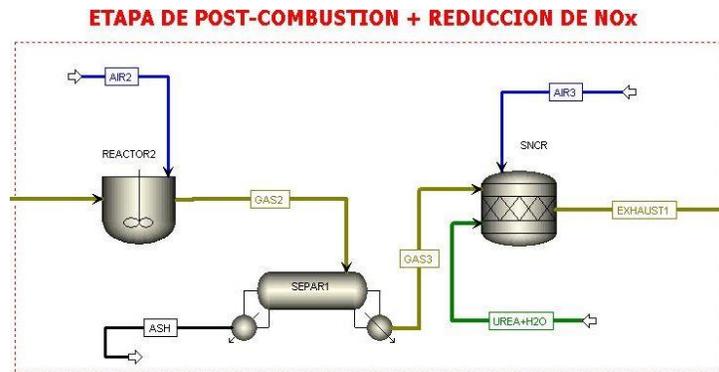


Figura 24. Modelo cámara de postcombustión Aspen Plus.

Etapa de generación de vapor y potencia:

La etapa de generación de vapor tiene lugar en la zona de caldera (Ver Figura 25), a la cual ingresan los gases de combustión (Corriente EXHAUST1) a altas temperaturas (800-1500°C) y agua a temperatura ambiente (Corriente WATER), para generar vapor de alta presión (400°C y 40 bar aprox). La cantidad de agua alimentada a la caldera y las condiciones de salida de los gases de combustión se establece con base en dos restricciones:

- ✓ La temperatura máxima permisible en gases de combustión para procesos de incineración (medidos a la salida de la chimenea), la cual es de 250°C. [55]
- ✓ Delta de temperatura entre el fluido caliente y el fluido frío, el cual es un criterio de diseño muy importante que define el tamaño del área de intercambio de la caldera.

Con base en estas dos restricciones se definió una temperatura de salida en los gases de combustión (Corriente EXHAUST2) de 150°C y se determinó la cantidad de agua alimentada a la caldera.

La caldera ha sido modelada empleando un bloque estándar de intercambiador de calor llamado MHEATX (Bloque B3), el cual permite realizar un balance global de energía calculando los coeficientes globales de transferencia.

El vapor obtenido en la caldera (Corriente VAPOR), es ingresado a una turbina isentrópica (Bloque TURBINE) con eficiencia y presión de descarga típicas de 0.9 y 0.15 bar, respectivamente [36]. Finalmente se obtiene vapor condensado (Corriente VAPOR-OUT) y potencia eléctrica bruta (Corriente POWER), a la cual posteriormente se le debe descontar la

energía requerida para operar la planta WTE (denominado Auxiliary) y obtener finalmente la potencia eléctrica neta que posteriormente se comercializa.

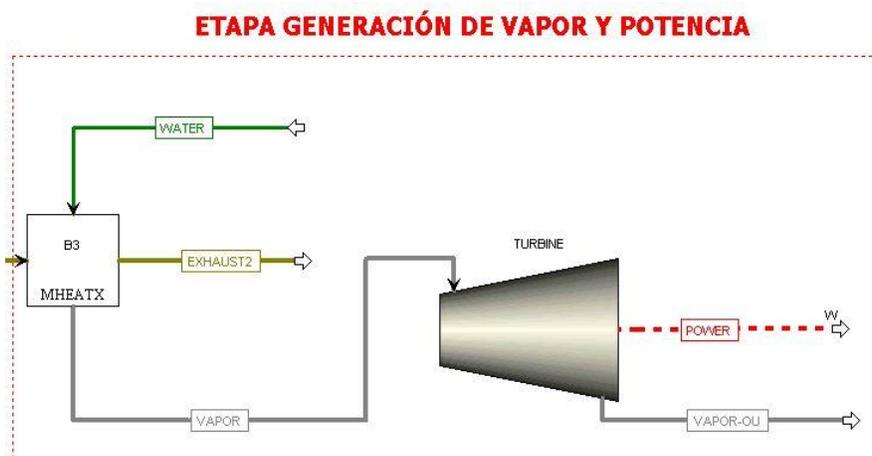


Figura 25. Modelo generación de vapor y potencia – Aspen Plus.

3.2.3 Validación del modelo

Como parte del proceso de validación se ha tomado como referencia el trabajo realizado por [36], los cuales desarrollaron un modelo de una planta WTE en Aspen Plus para incinerar RDF (residuos sólidos municipales sin fracción orgánica e inertes). El modelo propuesto por [36] fue replicado realizando leves modificaciones, tales como:

- En la etapa de combustión se simplifica el modelo eliminando el reactor estequiométrico, dado que, desde nuestro punto de vista, con el reactor en equilibrio (RGibbs) es suficiente para obtener las especies que se generan en el proceso de combustión.
- No se incluyen las operaciones unitarias para las etapas de abatimiento o tratamiento de Sox, HCl y material particulado, dado que, en esta etapa de pre-factibilidad el costo de tratamiento se estimará mediante factores.

En la Figura 26 se puede observar el modelo desarrollado por [36], el cual fue validado con los datos reales de operación de la Planta Wast to Energy ubicada en Ravenna – Italia y desarrollada por Lurgi Energie (Uno de los principales diseñadores y fabricantes de plantas Wte del mundo).

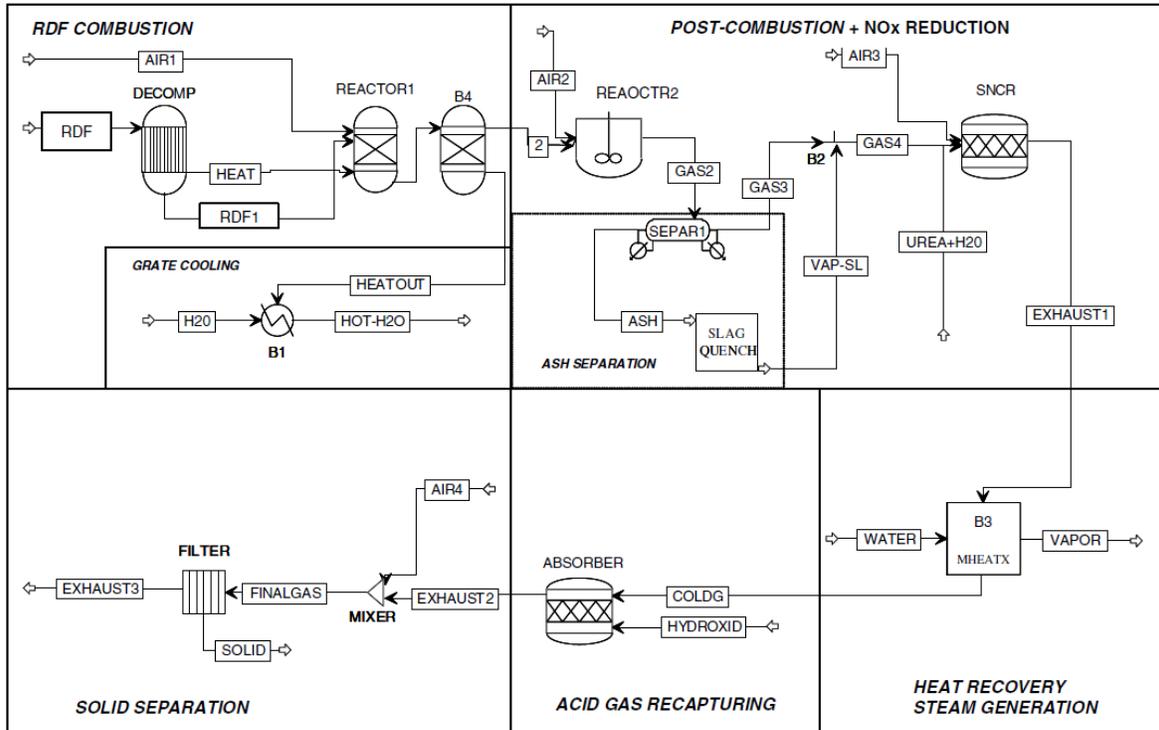


Figura 26. Esquema modelo Planta WtE propuesto por [36].

En la Tabla 30 se pueden observar los parámetros de entrada del modelo propio y el modelo de validación desarrollado por [36],

Tabla 30. Parámetros de entrada modelo de validación.

Parámetros entrada al modelo	Unidades	Valor
Flujo masico Alimentado	ton/día	301
PCI	MJ/kg	15.00
Aire en exceso combustión	%	25
Presión de vapor entrada a la turbina	Mpa	4
Temperatura de vapor entrada turbina	°C	400
Presión de descarga de la turbina	kPa	15
Eficiencia isentrópica	Adimensional	0.9
Análisis proximo (wt%)		
Humedad	% wt	20.00
Volátiles	% wt	75.95
Carbono fijo	% wt	10.23
Cenizas	% wt	13.81
Análisis último (wt%)		
Carbón	% wt	50.23

Hidrogeno	% wt	4.37
Nitrógeno	% wt	1.22
Cloro	% wt	1.13
Azufre	% wt	0.76
Oxigeno	% wt	28.48
Cenizas	% wt	13.81

En la Tabla 31 se pueden observar los resultados del modelo propio comparados contra el modelo desarrollado por [36], y los datos reales operativos de la planta WTE de Ravenna – Italia, desarrollada por Lurgie Energie.

Tabla 31. Resultados modelo de validación y datos reales de operación.

Resultados	Unidades	Modelos		
		Janelli- Minutillo	Modelo Propio	Lurgie Energie
EXHAUST 1				
Flujo masico H2O	kg/h	8,061	8,259	8,054
Flujo masico N2	kg/h	91,870	91,829	91,880
Flujo masico O2	kg/h	14,088	13,879	14,126
Flujo masico SO2	kg/h	32	152.68	30
Flujo masico HCL	kg/h	84	115	81
Flujo masico CO2	kg/h	18,447	18,608	18,406
Flujo masico Ar	kg/h	1,539	1,537	1,536
Temperatura	°C	1,121	1,082	1,141
SISTEMA DE GENERACIÓN				
Flujo de vapor	ton/h	54	54	54
Potencia Térmica	MW	52.16	48.37	52.16
Potencia eléctrica bruta	MW	12.13	11.43	12.13
Auxiliary estimado*	MW	1.64	1.54	1.64
Potencia eléctrica neta	MW	10.49	9.9	10.49
Eficiencia mecánica neta	%	20.1%	20.4%	20.1%

*El auxiliary es la potencia eléctrica requerida para operar la planta, se estima que esta corresponde entre el 10-15% de la potencia eléctrica bruta generada [6], para el caso de este modelo se consideró por [36] un 13,5%.

De la Tabla 30 y Tabla 31 se puede observar y concluir que el modelo desarrollado tiene un gran ajuste con respecto a los resultados obtenidos por [36] y los datos reales operativos reportados por los mismos autores para la planta de Lurgie Energie, por esta razón se considera que el modelo es apto para obtener los flujos de masa y energía, al igual que la

potencia eléctrica generada en el proceso WTE de incineración con base en las consideraciones anteriormente descritas.

Con el fin de verificar si el modelo desarrollado puede entregar resultados comparables con respecto a otros modelos de plantas WTE de características térmicas similares realizados por otros autores, se tomaron 2 artículos adicionales y se compararon los siguientes parámetros:

- Potencia térmica neta obtenida (MW)
- Potencia eléctrica bruta (MW)
- Auxiliary (MW)
- Eficiencia mecánica (%)
- Porcentaje de error (%)

Artículo 1: Process simulation and optimization of municipal solid waste fired power plant with oxygen/carbon dioxide combustion for near zero carbon dioxide emission [61].

Artículo 2: Influence of flue gas cleaning system on the energetic efficiency and on the economic performance of a WTE plant [39]

En la Tabla 32 se pueden observar los parámetros de entrada al modelo propio y reportado por los autores del artículo 1 y 2.

Tabla 32. Parámetros de entrada reportados por [61], [39].

Parámetros entrada al modelo	Modelos		
	Unidades	Guangchao	A. Poggio
Flujo masico Alimentado	ton/día	800	370
PCI	MJ/kg	14.68	15.38
Aire en exceso combustión	%	5	25
Presión de vapor entrada a la turbina	Mpa	4	5.98
Temperatura de vapor entrada turbina	°C	400	449.9
Presión de descarga de la turbina	kPa	23	10
Eficiencia isentrópica	Adimensional	0.8	0.9
Análisis proximo (wt%)			
Humedad	% wt	48.00	18.40
Volátiles	% wt	7.62	18.3
Carbono fijo	% wt	57.77	70.2
Cenizas	% wt	34.61	11.5

Análisis último (wt%)			
Carbón	% wt	34.61	11.50
Hidrogeno	% wt	34.62	48.498
Nitrógeno	% wt	4.87	6.903
Cloro	% wt	1.29	0.531
Azufre	% wt	0.67	0.80
Oxígeno	% wt	0.31	0.09
Cenizas	% wt	23.63	31.683

En la Tabla 33 se pueden observar los resultados obtenidos a partir del modelo desarrollado y comparado con respecto a los resultados obtenidos en los modelos de plantas WTE desarrollados por Guangchao y Poggio.

Tabla 33. Resultados modelo desarrollado vs modelo de Guangchao y Poggio.

Resultados	Unidades	Modelos			
		Guangchao	Modelo Propio	A. Poggio	Modelo Propio
Potencia térmica total	MW	-	47.91	65.9	57.14
Potencia eléctrica bruta	MW	11,974	12.07	18.3	17.75
Auxiliary reportado	MW	1.95	1.95	2.41	2.41
Potencia eléctrica neta	MW	10.03	10.1	15.89	15.34
Eficiencia mecánica neta	%	18.47%*	21.1%	24.1%	26.8%
Porcentaje de error	%	-12.5%	-10.2%	-10.2%	-10.2%

Como se puede observar en la Tabla 33, el modelo desarrollado presenta un porcentaje de desviación bajo para una etapa de pre-factibilidad, de acuerdo con la guía de estimación de costos de la Asociación Americana de Ingeniería de Costos (AAACE por sus siglas en inglés), la cual establece para una fase de estudio de pre-factibilidad un error permitido de +/- 30%. Dados los anteriores resultados se puede concluir que el modelo está validado y es apto para ser utilizado. En la siguiente sección se procederá al planteamiento y simulación de escenarios.

3.2.4 Simulación de escenarios de operación para la planta

Los escenarios de simulación propuestos están basados en las proyecciones establecidas en el PGIRS regional y ACODAL (Ver Figura 22), para el planteamiento de los escenarios se tomaron las proyecciones de generación y aprovechamiento de RSM hasta el horizonte de tiempo de 2030, tiempo considerado el más apropiado debido a que el tiempo de ejecución

de un proyecto WTE tomaría varios años en ejecutarse y esta sería una fecha para la cual se dispone de información. Con respecto a la caracterización química de los RSM, se considera que esta no presentará cambios significativos en su composición y Poder Calorífico.

Adicionalmente, se asume que los porcentajes de contribución del subsector residencial y no residencial permanecerán constantes hasta el 2030, tal como se puede observar en la Tabla 9.

Los escenarios propuestos para llevar a cabo las simulaciones se pueden observar en la Tabla 34:

- **Escenario 1:** Proyección de la disposición de RSM sin considerar intervención del reciclaje. Para el PCI de este escenario se estimó multiplicando el PCI reportado en la Tabla 19 por la contribución de los RSM residenciales y no residenciales reportados en la Tabla 9.
- **Escenario 2:** Proyección de la disposición de RSM si se mantienen las condiciones actuales de generación y aprovechamiento en el AMVA (aprovechamiento reciclaje 15.3%, aprovechamiento orgánico 1.9%). Para el PCI de este escenario se estimó multiplicando el PCI reportado en la Tabla 19 por la contribución de los RSM residenciales y no residenciales reportados en la Tabla 9.
- **Escenario 3:** Proyección de la disposición de RSM considerando solo el aprovechamiento de los RSM no – residenciales (rutas selectivas como las que empezaran a operar a finales del 2021) [62].
- **Escenario 4:** Proyección de la disposición de RSM considerando la implementación a 2030 del plan de aprovechamiento planteado en el PGIRS. Aprovechamiento de 40% de residuos orgánicos de un potencial de 55% y un aprovechamiento de la totalidad del potencial reciclable (30%), para un total de aprovechamiento del 70% de los RSM generados en 2030.

Tabla 34. Escenarios planteados para la simulación de la planta WTE.

Información/Escenario	1	2	3	4
Generación de RSM a 2030 (ton/día)	4,732	4,732	4,732	4,732
Aprov. actual proyectado a 2030 (ton/día)	N/A	1,011	N/A	N/A
Generación subsector residencial 2030 (ton/día)	N/A	N/A	3,250	N/A
Aprov. PGIRS a 2030 (ton/día)	N/A	N/A	N/A	3,732
RSM disponibles para WTE (ton/día)	4,732	3,721	1,482	1,000
PCI (kcal/kg)	866.5	866.5	1,872	1,872

• **Resultados simulación de escenarios**

Luego de llevar a cabo las simulaciones de los cuatro (4) escenarios planteados en la sección anterior, se presentan los parámetros de entrada al modelo para cada escenario (Tabla 35). Adicionalmente, en las Tabla 37 y Tabla 38 se presentan los resultados de la simulación de escenarios.

Tabla 35. Parámetros de entrada al modelo – Simulación de escenarios

Parámetros de entrada al modelo	Unidades	Escenarios				
		1	2	3	4	5
Flujo masico RSM Residencial	ton/día	3,251	2,695	0	352	
Flujo masico RSM No-Residencial	ton/día	1,481	1,026	1,482	642	
PCI RSM Residencial	MJ/kg	1.71	1.71	1.71	1.71	1.71
PCI RSM No-Residencial	MJ/kg	7.83	7.83	7.83	7.83	7.83
Aire en exceso combustión	%	25	25	25	25	25
Concentración de Urea en agua	%	12	12	12	12	12
Presión de vapor entrada a la turbina	Mpa	4	4	4	4	4
Temperatura de vapor entrada turbina	°C	400	400	400	400	400
Presión de descarga de la turbina	kPa	23	23	23	23	23
Eficiencia isentrópica	Adimensional	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9

Como parte del análisis y simulación de escenarios se compararon las concentraciones de los contaminantes en el aire regulados en la resolución 909/2008 contra los obtenidos en el proceso de incineración de RSM a partir del modelo planteado. En la Tabla 36 se pueden observar los límites máximos permisibles en procesos de incineración y en la Tabla 37 se puede observar la concentración obtenida para estos contaminantes.

Tabla 36. Estándares de emisión admisibles de contaminantes en aire en procesos de incineración – Resolución de fuentes fijas 909/2008 [55]

Parámetros de entrada/referencia	Unidades	Valor
		1
Estándar de emisión admisible CO*	ppm	100
Estándar de emisión admisible SO ₂ *	ppm	200
Estándar de emisión admisible NO _x *	ppm	400
Estándar de emisión admisible HCL*	ppm	40

Tabla 37. Resultados modelos simulación de escenarios.

Resultados modelo simulación	Unidades	Escenarios			
		1	2	3	4
Concentración CO gases salida caldera	ppm	38	35	21	12
Concentración NO _x gases salida caldera	ppm	167	195	246	218
Concentración SO ₂ gases caldera	ppm	662	737	425	541
Concentración HCL gases salida caldera	ppm	341	379	219	278
Potencia Térmica	MW	335	258	160	88
Potencia eléctrica bruta (gross power)	MW	95.08	73.07	45.43	24.9
Auxiliary considerado	MW	12.86	9.88	6.14	3.37
Potencia eléctrica neta	MW	82.22	63.19	39.29	21.53
Potencia eléctrica específica	MW/ton	0.482	0.471	0.736	0.601
Eficiencia mecánica neta	%	24.5%	24.5%	24.5%	24.5%

Adicionalmente, en la Tabla 38 se reportan los principales flujos másicos y temperaturas.

Tabla 38. Principales flujos másicos y temperaturas – Escenarios simulados

Resultados	Unidades	Escenarios			
		1	2	3	4
Flujo masico vapor	ton/día	9,072	6,972	4,336	2,376
Flujo masico gases de combustión	ton/día	13,588	10,417	6,882	3,694
Temperatura gases combustión	°C	1,595	1,595	1,595	1,595
Flujo masico de Urea + agua	ton/día	103	99	95	45
Flujo masico cenizas + inquemados	ton/día	558	458	44	75
Flujo masico de gases a depurar	ton/día	14,275	10,086	6,960	3,671
Temperatura gases a depurar	°C	148	151	149	153

Como se puede observar en la Tabla 37, las concentraciones para el CO y el NO_x, se encuentran por debajo del límite máximo permisible, lo cual permite cumplir con lo requerido en la resolución 909-2,008 para los cuatro (4) escenarios simulados, sin embargo, se puede observar que las concentraciones del SO₂ y HCL se encuentran por encima del nivel máximo permisible, esto es debido a que en el alcance del modelo no se consideraron las etapas de

absorción de SO_x y HCl las cuales si fueron incorporadas en el modelo original y cuyas eficiencias de remoción se reportaron en 86.5% y 99% respectivamente, lo cual daría como resulta concentraciones de SO_x <100 ppm y HCl <10 ppm en todos los escenarios simulados. Para efectos posteriores, los costos de tratamiento de estos contaminantes se realizarán empleando factores reportados en la literatura.

En la Tabla 37, también es posible apreciar que las potencias obtenidas están acordes con lo esperado y corresponden a ordenes de magnitud de plantas WTE operativas, de acuerdo con un estudio reportado por [6], el valor promedio de PCI en 97 plantas operativas de Europa es de 10MJ/kg y generan una potencia térmica de 2.8 MWh/ton. Si se observa los resultados obtenidos se puede encontrar que se obtuvieron potencias térmicas de 1.7, 1.66, 2.6 y 2.2 MWh/ton para el escenario 1, 2, 3 y 4 respectivamente.

Se puede observar que la potencia térmica específica generada en el escenario 1 y 2 es muy baja con respecto al estándar, sin embargo, esto se debe a que en estos escenarios el PCI es muy inferior al estándar de 10MJ/kg, sin embargo, es posible observar que para el escenario 3 y 4, los valores son muy cercanos al estándar, principalmente en el escenario 3, en el cual el PCI corresponde a 7.83 MJ/kg. Lo anterior nos permite concluir que a pesar de las suposiciones/consideraciones del modelo (dado que no se realizó un modelo riguroso donde se consideren pérdidas de calor), este entrega resultados con muy buena precisión para una etapa de pre-factibilidad.

De acuerdo con [6] las instalaciones WTE de EE. UU. que solo generan electricidad, recupera 0.55 MW/ton, mientras que las instalaciones más recientes y tecnificadas, como la de AEB Ámsterdam, proporcionan a la red 0.7 MW/ton. Como se puede observar en los resultados obtenidos, la potencia eléctrica específica obtenida en los escenarios 1 y 2, está más cerca de los rendimientos de las plantas operativas de EE. UU. (0.482 MW/ton y 0.471 MW/ton, respectivamente), mientras que los rendimientos de los escenarios 3 y 4 son similares a las reportadas en instalaciones más modernas (0.736 MW/ton y 0.601 MW/ton, respectivamente). Es importante considerar que en un modelo que considere pérdidas de calor, un mayor número de ineficiencias en las operaciones unitarias, entre otras. Estos valores serán menores. Sin embargo, para una fase de pre-factibilidad se pueden considerar valores con un nivel de incertidumbre adecuado.

Con base en los resultados obtenidos se puede concluir que los dos (2) escenarios cuyos resultados están acordes con los estándares de generación esperados para plantas WTE de características térmicas, son los escenarios 3 y 4. Sin embargo, se considera que el escenario más apto para continuar con el análisis financiero y pre-factibilidad del proyecto corresponde al escenario 3, por las siguientes razones:

1. El escenario 3 esta soportado en un escenario que considera solo la incineración de RSM no residenciales, este escenario está a punto de volverse técnica y logísticamente factible, dado que EMVARIAS como parte de su estrategia corporativa está finalizando un proyecto clave denominado ESTACIÓN DE TRANSFERENCIA, la cual tendrá como propósito canalizar los residuos del AMVA con la finalidad de transferirlos a tracto-camiones de alta capacidad para llevarlos al relleno sanitario La Pradera, disminuyendo de esta forma los costos logísticos significativamente. Se estima que la estación de transferencia inicie operaciones a mediados del año 2,022. Sumado a lo anterior, ya se encuentra en ejecución un proyecto clave, denominado RUTAS SELECTIVAS, el cual tiene como propósito recolectar solo los RSM no residenciales. Con la implementación de estas dos (2) iniciativas el escenario 3 podría ser viable a partir del año 2022 [62].

Por el contrario, el escenario 4 está basado en el cumplimiento de las metas propuestas del PGIRS a 2,017-2,030, el cual es una meta ambiciosa y del cual no se conocen las implicaciones del COVID-19 sobre las necesidades presupuestarias para llevar a cabo este plan hasta 2,030. Adicionalmente, y dado su carácter público se tiene el riesgo de que las metas del PGIRS 2,017-2,030 no sean una prioridad para las administraciones futuras, por lo que la implementación del escenario 4 es menos probable que la implementación del escenario 3.

2. El escenario 3 presenta una mayor potencia térmica y una mayor generación de eléctrica específica que el escenario 4.
3. El escenario 3 presenta menor generación de cenizas e inquemados que el escenario 4, lo que implica menores costos de disposición

4. Los RSM alimentados en el escenario 3, poseen un PCI mayor que el escenario 4, dado que no considera la alimentación de RSM residenciales, los cuales tienen un alto contenido de humedad.
5. De acuerdo con [6], la experiencia internacional indica que el costo de una planta WTE con capacidades inferiores a 300,000 ton/año (820 ton/día aprox) es extremadamente alto, mientras que los beneficios en costos de aumentar la escala de las instalaciones disminuye por encima de 400,000 ton/año (1,095 ton/día aprox), con base en lo anterior se puede observar que el escenario 4 (1,000 ton/día) se encuentra en condiciones menos favorables en costos de inversión para una planta WTE.

Capítulo 4

4 Estudio de prefactibilidad

4.1 Análisis de localización

Según el Decreto 1077 de 2015 [55] se define como actividad complementaria a la disposición final de los RSM, la actividad del tratamiento la cual se define como “la actividad del servicio público de aseo, alternativa o complementaria a la disposición final, en la cual se propende por la obtención de beneficios ambientales, sanitarios o económicos, al procesar los residuos sólidos a través de operaciones y procesos mediante los cuales se modifican las características físicas, biológicas o químicas para potencializar su uso. Incluye las técnicas de tratamiento mecánico, biológico y térmico. Dentro de los beneficios se consideran la separación de los residuos sólidos en sus componentes individuales para que puedan utilizarse o tratarse posteriormente, la reducción de la cantidad de residuos sólidos a disponer y/o la recuperación de materiales o recursos valorizados”. De igual forma el Decreto 1077 de 2,015, determina que los municipios son los responsables de seleccionar las áreas potenciales

para la disposición final de residuos sólidos dentro de los planes de gestión integral de residuos sólidos (PGIRS), también son responsables de determinar estas áreas dentro de los planes de ordenamiento territorial POT.

La metodología para la selección de la ubicación de la planta de aprovechamiento térmico (Waste to Energy) para el aprovechamiento de RSM, se define con base en la técnica empleada para la selección de los rellenos sanitarios debido a la similitud y propósito de ambas instalaciones, considerando que el área donde se ubique sea suficiente en concordancia con la proyección de generación de residuos sólidos estimada.

De acuerdo con la [46] “En noviembre de 2,001 el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, presentó un documento sobre el reconocimiento de 41 sitios posibles para disposición final de residuos, localizados en su mayoría dentro de los municipios que conforman la cuenca del río Aburrá y algunos por fuera de ella, enmarcados en lo que se denominó plan maestro de residuos sólidos”.

“La metodología de evaluación de estos sitios calificó tres aspectos esenciales de los sitios: el ambiental, el técnico y el social. El sitio en su momento escogido y que ayudaría a solucionar la contingencia en vista del cierre del relleno sanitario Curva de Rodas fue el lote ubicado en el municipio de Don Matías, sitio donde actualmente funciona el relleno sanitario La Pradera y que recibió el nombre de Parque Ambiental La Pradera operado por EMVARIAS”.

Como resultado del PGIRS se llevó a cabo la evaluación con base en la metodología para la evaluación de sitios factibles para la disposición de residuos en relleno sanitario, la metodología de evaluación se realizó mediante el decreto 838 de 2005 [55], como resultado de esta evaluación se lograron definir las ubicaciones más apropiadas a lo largo de todo el Valle de Aburrá, las cuales fueron categorizadas como optima, buena, aceptable, regular y deficiente.

- **Análisis de posibles sitios para ubicación de planta Waste to Energy**

La metodología utilizada para la evaluación de los sitios se resume en las siguientes etapas:

Revisión de información primaria

- Microzonificación sísmica de los municipios del Valle de Aburrá y definición de zonas de riesgo por movimientos en masa e inundaciones.
- POMCA (Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del río Aburra)
- PGIRS

Análisis de información de sitio: Con base en la información primaria, las bases de datos geológicas generadas por arcgis y los parámetros definidos en el decreto 1077 de 2,005.

Elaboración matriz de evaluación: La matriz de evaluación se definió con base en los sitios propuestos por el PGIRS/2005 y los parámetros de calificación presentados en el decreto 1077 de 2015 (ver Tabla 39).

Tabla 39. Sitios propuestos para disposición final de residuos.

Nº	NOMBRE	ESTADO	AREA (Ha)
1	El Sesenta	Proyectado	4
2	San Fernando	Proyectado	25
3	La Clara	Proyectado	100
4	La Estrella	Proyectado	-
5	La Tablaza	Proyectado	8
6	Cañaveralejo	Proyectado	31
7	El Guacal	Activo	
8	Chuscal baja	Proyectado	6
9	Chuscal alto	Proyectado	5,8
10	Padre Amaya	Proyectado	46
11	La Volcana	Proyectado	4
12	Rodas	Clausurado	17
13	La Frisola	Proyectado	0,8
14	El Peñolsito	Proyectado	9,8
15	Bello	Proyectado	75
16	El Totumo	Proyectado	26,8
17	Áridos	Proyectado	17
18	Topco	Proyectado	14
19	El Cortado	Proyectado	14
20	Barro Blanco	Proyectado	132
21	El Hatillo	Proyectado	51
22	El Tirol	Proyectado	12
23	El Túnel	Proyectado	19
24	Kimberly	Proyectado	10
25	La Pradera	Activo	215

N°	NOMBRE	ESTADO	AREA (Ha)
26	Popalito	Proyectado	60
27	Relleno Tafetanes	Proyectado	-
28	Tejicondor	Proyectado	14
29	Salada	Proyectado	180

Recolección de la información: Para la obtención de la información se hizo uso de los resultados consignados por el PGIRS/2015, en el cual se realizó el estudio de superposición de restricciones utilizando el software arcgis, en el cual se ingresaron los mapas de:

- ✓ Fuentes superficiales.
- ✓ Fuentes subterráneas.
- ✓ Hábitats naturales críticos.
- ✓ Áreas con fallas geológicas.

Posteriormente se cruzaron estos mapas con las variables de prohibición establecidas en el decreto 1077 de 2015, tales como:

- ✓ Acueductos veredales
- ✓ Drenajes.
- ✓ Embalses.
- ✓ Zonas de recarga de acuíferos.
- ✓ Áreas protegidas a nivel nacional y regional.
- ✓ Límite de reserva.
- ✓ Parques nacionales.
- ✓ Zonas de protección del Área Metropolitana del Valle de Aburrá.
- ✓ Fallas geológicas.

Luego de realizado el análisis se descartaron 20 de los 29 sitios inicialmente propuestos en el PGIRS/2015. En la siguiente Tabla 40 se pueden observar los sitios que se consideraron aptos.

Tabla 40. Sitios aptos sin prohibición.

N°	NOMBRE	ESTADO
1	El Guacal	Operación suspendida temporalmente
2	El Hatillo	Proyectado
3	El Tirol	Proyectado
4	El Túnel	Proyectado
5	Kimberly	Proyectado
6	La Pradera	Activo
7	Popalito	Proyectado
8	Relleno Tafetanes	Proyectado
9	Tejicondor	Proyectado
10	Salada	Proyectado

Para llevar a cabo la valoración de algunos de los parámetros definidos en el decreto para la matriz de evaluación sería necesario realizar una visita de campo. Sin embargo, por efectos de tiempo y recursos económicos esta valoración se realizará con base en estudios previos, información del SIG-OT (Sistema de Información Geográfica para la Planeación y el Ordenamiento Territorial) y del IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi).

Para la calificación y selección del sitio fueron definidos los siguientes parámetros con base en el decreto 1077/2015 [55], tal como se puede observar en la Tabla 41.

Tabla 41. Parámetros de evaluación para selección de sitio con base en el decreto 838 de 2005.

Criterio	Parámetros geológicos
Capacidad	El área donde se ubicará el relleno sanitario (en este caso la planta de tratamiento Waste to Energy), debe ser suficiente para permitir que la vida útil de este sea compatible con la producción proyectada de residuos sólidos a disponer en el mismo.
Ocupación actual del área	Determina las actividades que actualmente se vienen realizando con el objeto de prever posibles impactos sobre la comunidad o los recursos naturales.
Accesibilidad vial	Facilidad y costo de acceso para que el ente prestador del servicio de recolección y transporte pueda llevar los RSM

	El parámetro considera: <ul style="list-style-type: none"> ✓ Condiciones de acceso a la vía ✓ Pendiente o peralte de la vía ✓ Distancia desde la vía de acceso ✓ Número de vías de acceso
Condiciones de suelo y topografía	Condiciones que favorecen las obras y trabajos civiles en la zona, mediante la tecnología Waste to Energy, se evalúa el criterio de excavabilidad
Distancia al centroide urbano hacia el área de disposición final.	Este criterio se asocia a los costos de transporte en que incurriría la persona prestadora del servicio público de aseo para llevar los residuos sólidos desde el perímetro urbano, incluida la zona de expansión urbana, al área en la que se efectuará el tratamiento final de los residuos.
Densidad poblacional en el área	Posible afectación a la población cercana
Incidencia en la congestión de tráfico en la vía principal	Tráfico de vehículos en las zonas circundantes
Dirección de los vientos	Parámetro que determina la propagación de olores hacia comunidades vecinas.
Restricciones en la disponibilidad del área	Evaluación de las restricciones para los sitios con base en el Artículo 6° Numeral 2 del decreto [55].
Prohibiciones	Corresponden a las áreas donde queda prohibido la localización, construcción y operación de rellenos sanitarios y por ende de plantas WtE, tales como: Fuentes hídricas, reservas naturales, fallas geológicas, etc

A continuación, se presenta los resultados de la matriz de evaluación para los sitios propuestos, tal como se observa en la Tabla 42 y la Figura 27.

Tabla 42. Sitios propuestos para ubicar la planta Waste to Energy

Sitio	Puntuación	Porcentaje de evaluación (%)
Tafetanes	506	62,32%
El Tirol	428	52,32%
El Hatillo	576	70,94%

Tejicondor	0	0,00%
Salada Baja	604	74,38%
Barro Blanco	0	0,00%
Kimberly	320	39,41%
Popalito	514	63,30%
El Túnel	624	76,85%

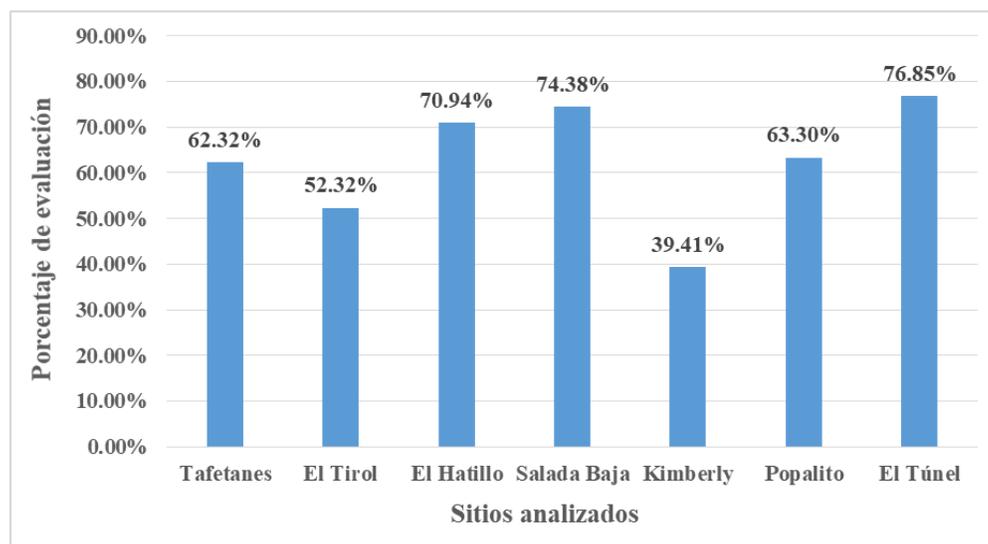


Figura 27. Porcentaje de evaluación sitios analizados.

De los cinco (5) sitios que obtuvieron mayor puntaje (El Túnel, Salada Baja, El Hatillo, Popalito y Tafetanes), dos (2) se encuentran ubicados al norte de la ciudad y hacen parte del municipio de Barbosa, El Hatillo y Popalito. De ambos es de resaltar la buena accesibilidad vial y adecuadas condiciones geológicas con las que cuentan, sin embargo, estos sitios se encuentran cerca de zonas pobladas.

Por su parte El Túnel se localiza al oriente de la ciudad de Medellín. Presenta una gran problemática dada por la cercanía con la vía Medellín Bogotá y la cantidad de fincas en el área aledaña. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el oriente es una zona en la cual, la actividad económica más importante es la agricultura.

En el occidente se encuentra Tafetanes, localizado en el municipio de Sopetrán. Este sitio posee condiciones geológicas adecuadas, sin embargo, gran parte de su área se encuentra sobre zona de bosque seco tropical que genera altas restricciones para la ubicación de infraestructura asociada a la gestión de residuos sólidos, ya que es una zona de protección, por otra parte, alrededor del lote se aprecian fincas de recreo.

En el Sur se encuentra Salada baja, localizado en el municipio de Caldas, este sitio posee condiciones geológicas adecuadas para la ubicación de infraestructura asociada a la gestión de residuos sólidos, actualmente se encuentra en ampliación la vía de acceso aledaña al predio.

En conclusión la metodología de localización para la ubicación de sitios para la disposición final de los residuos deja propuestas cinco áreas basándose en la evaluación de las variables técnicas y ambientales, sin embargo es importante mencionar que no se tienen en cuenta muchas variables sociales que pueden hacer que este tipo de proyectos no sean viables, por lo que dichos análisis deben ser complementados con estudios de factibilidad que determinen el potencial real del área para su uso como sitio de disposición final. Para propósitos de la evaluación en el modelo financiero y dejando de lado las posibles restricciones sociales que puedan dar lugar en un futuro, se elegirá la ubicación de El Tunel.

4.2 Evaluación financiera

El objetivo de la evaluación financiera es determinar los niveles de rentabilidad del proyecto y la estructura óptima de financiamiento. Para esto, se elaboró un modelo generalizado que considera variables de entrada (inputs), principalmente ingresos y costos (CAPEX Y OPEX). El modelo permite realizar una proyección de los flujos del proyecto a 20 años, período considerado como la vida útil promedio de la planta de incineración WTE.

La estructura del modelo financiero se puede observar en la Figura 28.

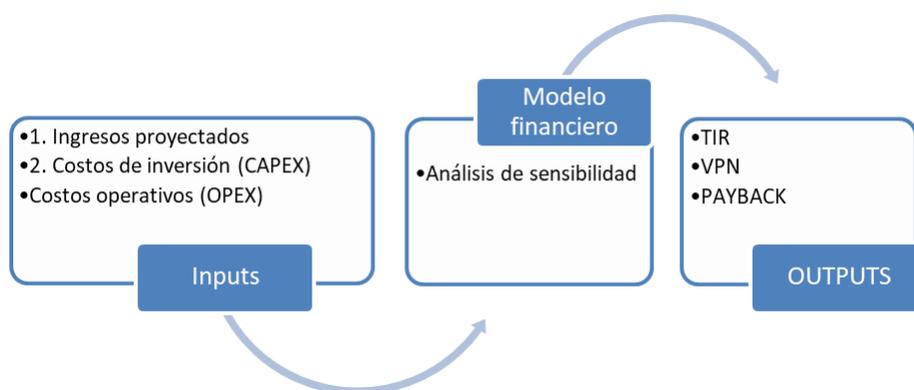


Figura 28. Estructura esquemática modelo financiero

Las variables de entrada al modelo financiero son las siguientes (inputs):

4.2.1 Costos de inversión (CAPEX):

- ✓ Costo adquisición de equipos
 - Costo de los equipos
 - Instrumentación
 - Taxes
 - Cargue y transporte (Freight)
 - Costos de importación
- ✓ Costos directos de instalación
 - Obras civiles (Fundaciones, soporteria y montaje)
 - Obras eléctricas
 - Piping y ducteria
 - Aislamiento
 - Pintura
- ✓ Costos indirectos de instalación
 - Ingeniería
 - Costos de implementación (Construction and field expenses, Contractor fees)
 - Comisionamiento (Start-up, Performance test)

Los costos de inversión en función de la capacidad anual para una planta WTE nueva de incineración de residuos se puede observar en la Figura 29. [6]

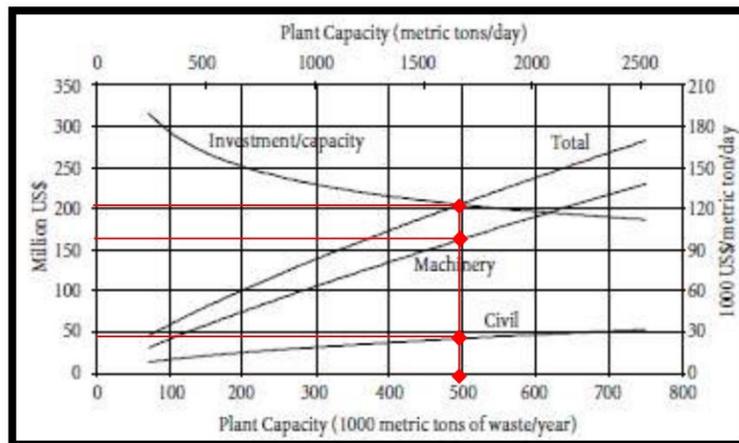


Figura 29. Costo de inversión para plantas WTE de incineración de residuos.

Como se puede observar, el volumen de residuos en el escenario estudiado corresponde a 1482 ton/día. Considerando que una instalación WTE está obligada a operar a capacidad plena por más de ocho mil horas/año (disponibilidad >90%) y considerando los tiempos no programados de operación debido a mantenimientos programados, se considera un tiempo total de operación de 8040 horas/año, lo cual equivale a una planta con capacidad de 496.470 ton/año. [6]

Con base en la Figura 29. Se puede observar que el costo total de adquisición de equipos y la obra civil tienen un costo total de 205 MUSD (Maquinaria= 157 MUSD, Obra civil=48 MUSD)

El costo de maquinaria considera los sistemas típicos de una planta de incineración WTE:

- Incinerador
- Sistema de generación de vapor (super calentadores)
- Sistema gas cleaning:
 - ✓ Ciclón
 - ✓ Hot ESP
 - ✓ Sistema de desulfurización (NID-reactor and Turbosorp)
 - ✓ Baghouse
 - ✓ Sistema de reducción de NOx (SCR, Selective catalytic NOx reduction)
 - ✓ Chimenea
- Turbina y generador

Con base en el costo de la maquinaria y el manual de estimación de costos de este tipo de tecnologías publicado por la Agencia de Protección Ambiental (EPA por sus siglas en inglés), se estimaron los demás costos de inversión como se observa en la Tabla 43. [63].

Tabla 43. Costos de inversión (CAPEX)

CAPEX		Planta WTE incineración
Costo de adquisición del equipo		
Costo del equipo	USD	157,000,000
Instrumentación	%	5
Taxes	%	3

Transporte (marítimo)	%	5
Costo de importación	%	30
Costo total adquisición de equipo	USD	224,510,000

Costos Directos de instalación		ESP
Fundación y soporteria	%	14
Manejo y montaje	%	8
Obras eléctricas	%	10
Piping	%	1
Ductos	%	10
Aislamiento	%	2
Pintura	%	2
Costo directo de instalación	USD	73,790,000
Total costo directo	USD	298,300,000

Costos de instalación indirecta		ESP
Ingeniería	%	10
Construction and field expenses	%	5
Contractor fees	%	5
Arranque	%	2
Performance test	%	2
Contingencias	%	5
Total costos indirectos	USD	45,530,000

Costo total de capital (CAPEX)	USD	343,830,000
Costo total de capital	USD/ton	692

Como se puede observar en los resultados obtenidos en la tabla anterior, el costo específico de capital corresponde a 692 USD/ton procesada, el cual corresponde en orden de magnitud con los estudios de plantas WTE por incineración realizados para las ciudades de Valparaíso/Chile (670 USD/ton), Buenos Aires/Argentina (595 USD/ton) y Toluca/México (750 USD/ton). [5]

Adicionalmente, es necesario estimar el costo de adquisición de terreno, el cual y con base en la sección 2.3.4 de la guía. Para una planta de 2 líneas con capacidad de 336,000 ton/año el terreno requerido equivale a 82,800 metros cuadrados, mientras que para una planta de 2

líneas con capacidad de 640,000 ton/año se requieren 105,800 metros cuadrados, de los cuales la planta ocupara el 29% y 44%, respectivamente. En nuestro caso la capacidad de procesamiento de la planta será de 493,506 ton/año por lo que, interpolando, el área requerida sería de 94.716 metros cuadrados [6].

De acuerdo con la búsqueda realizada en el sector peñolcito (El Tunel) el costo promedio por metro cuadrado es 62,000 COP (Pesos colombianos), el costo total del terreno sería de 5,872,392,000, considerando una TRM al momento de este estudio de 3,760 COP/USD, el costo de adquisición de terreno sería de 1.56 MUSD.

4.2.2 Costos de operación y mantenimiento (OPEX):

- ✓ Productos químicos para el sistema off-gas cleaning system (cal, urea, carbón activado, etc)
- ✓ Mantenimiento de equipos
- ✓ Otros: Manipulación y eliminación de cenizas, Pruebas ambientales, Seguros
- ✓ Personal (directo e indirecto)

Los costos de operación como una función de la capacidad anual (y diaria) para una típica nueva planta de incineración de residuos se estiman en la Figura 30. Costos operativos planta WTE por incineración [6].

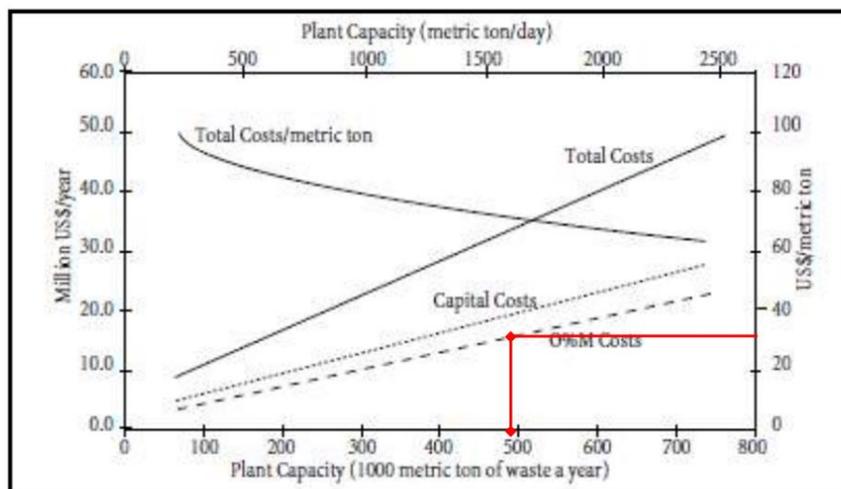


Figura 30. Costos operativos planta WTE por incineración

De la Figura 30 se puede observar que el costo operativo y de mantenimiento (O&M) total equivale a 32 USD/ton procesada y el costo de O&M total a 15.77 MUSD/año.

Los anteriores costos de operación consideran, con base en la guía de implementación de proyectos WTE [6]:

- ✓ Eliminación de cenizas (3.75 USD/ton)
- ✓ Productos químicos (4.0 USD/ton)
- ✓ Servicios de limpieza de gases/sistema off-gas cleaning system (6 USD/ton)
- ✓ Mantenimiento (15.5 USD/ton)
- ✓ Varios (0.25 USD/ton)
- ✓ Personal directo e indirecto (1.3 USD/ton)
- ✓ Contingencia (3%)
- ✓ Seguros (0.6%)

El personal directo e indirecto para una planta de procesamiento de 500,000 ton/año aproximadamente, considera los siguientes perfiles de cargo: [6]

- ✓ Administrador de la instalación (1)
- ✓ Asistente administrativo (1)
- ✓ Personal administrativo (6)
- ✓ Ingeniero jefe (1)
- ✓ Ingeniero asistente (1)
- ✓ Auxiliar de laboratorio (2)
- ✓ Supervisor de turno (5)
- ✓ Operadores sala de control (5)
- ✓ Operadores de grúas (10)
- ✓ Seguridad (2)
- ✓ Vigilantes (2)
- ✓ Otros (2)

4.2.3 Los ingresos generados por el proyecto:

- ✓ Venta de energía eléctrica
- ✓ Ingresos por tarifa de disposición final (Gate Fee)
- ✓ Ingresos por venta de bonos de carbono
- ✓ Venta de los subproductos comercializables (metales ferrosos y no ferrosos)

Los ingresos generados por el proyecto se centran principalmente en 4 fuentes, las cuales son: Tasa de entrada o tarifa por recepción de RSM hacia la planta WTE, ganancias por venta de energía eléctrica hacia la red interconectada nacional, ingresos por concepto de bonos verdes o créditos de carbono y por último los ingresos provenientes por la venta de metales ferrosos y no ferrosos recuperados de las cenizas o los inquemados que salen del incinerador.

- **Ingresos por tarifa de tratamiento (Current gate fee):** Debido al alto costo de capital de una WTE, la tarifa de entrada requerida está obligada a ser superior a la que se cobra por disposición en relleno sanitario. Sin embargo, en términos generales los rellenos sanitarios están situados a mayor distancia de los centros urbanos que las plantas WTE, y esto requiere la construcción de estaciones de transferencia de residuos, donde la carga de los camiones de recogida se transfiere a los camiones de larga distancia y los costos de transporte desde las estaciones de transferencia a los rellenos sanitarios son más altos. Para propósitos de este estudio se va considerar que la tarifa de tratamiento en planta WTE será la tarifa compuesta por costo de transporte por tramo excedente.

De acuerdo con la guía metodológica de costos y tarifas para el servicio público de aseo, el costo excedente se encuentra establecido en \$665/km ton-mes. De acuerdo con la ubicación del relleno sanitario La pradera, este se encuentre a 50.9 km desde la futura estación de transferencia. Por lo cual, la distancia excedente corresponde a 30.9 km, lo cual tendría un costo de 20,548 \$/ton-mes. [64]. Adicionalmente, se debe incluir el costo de disposición final el cual de acuerdo con los datos reportados por EMVARIAS, para el año 2,021 corresponde a 24,549\$/ton-mes. [62].

Con base en lo anterior se puede establecer que los ingresos por tarifa de tratamiento corresponden a 45,097\$/ton-mes (equivalente a 12 USD/ton). Considerando 1,482 ton/día y un total de 333 días/mes (8,040 horas/año). Se tendrían unos ingresos totales de 22,255,640,082 COP, considerando una TMR al momento de este análisis de 3,760 COP/USD, los ingresos totales anuales serian de 5.92 MUSD o 12 USD/tonelada procesada.

- **Ingresos por venta de energía eléctrica a la red**

De acuerdo con el estudio realizado por la UPME [65], se proyectaron los precios de energía para todos aquellos generadores que inyecten energía a la red interconectada nacional. Estas

proyecciones consideran el cargo por confiabilidad, en la Figura 31. Se pueden observar estas proyecciones.

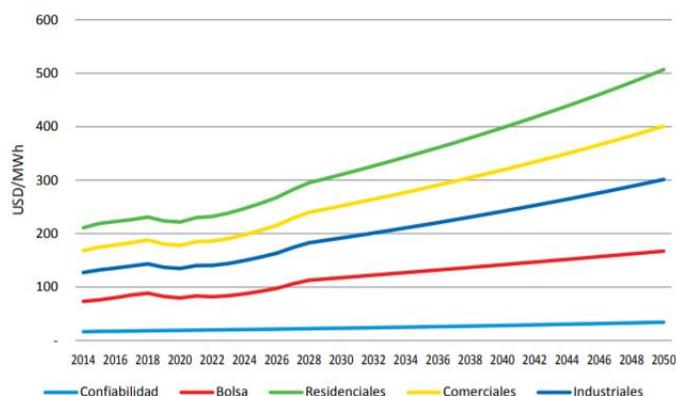


Figura 31. Proyección de precios de energía eléctrica en Colombia.

En la Figura 31 se puede observar que para el año 2,021, este costo equivale a 95 USD/MWh. Este valor concuerda en orden de magnitud con precios de energía/MWh reportados en estudios previos Valparaíso/Chile (90 USD/MWh), Buenos Aires/Argentina (102 USD/MWh), Ciudad de México/México (90 USD/MWh).

De acuerdo con los resultados de las simulaciones reportadas en la Tabla 37, para el escenario 3, la generación neta de energía es de 39.29 MWh. Considerando una operación total de 8,040 h/año, obtendríamos unos ingresos totales por ventas de energía de 30 MUSD o 60.08 USD/tonelada procesada.

- **Ingresos por bonos verdes o créditos de carbono**

Para el cálculo de los bonos verdes o créditos de carbono se hizo uso del factor de 0.6 toneladas de CO₂/MWh definido en el Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático [6]. Con base en esto y considerando que se tiene una generación de 39.29 MWh. Se tendría una estimación de 189.535 toneladas de créditos de CO₂ (REC “reducciones certificadas de emisiones”).

De acuerdo con la sección 5.18 de la Guía, los créditos de CO₂, tienen un valor entre 12-20 USD/RCE, para efectos de este análisis se trabajará con el valor promedio de 16 USD/RCE. Por lo tanto, los ingresos por créditos verdes son de 3.03 MUSD o 6.14 USD/ton.

- **Ingresos por venta de metales ferrosos y no ferrosos**

Como parte de los otros ingresos que se pueden obtener, está la venta de metales ferrosos y no ferrosos que se pueden recuperar de las cenizas de fondo en el incinerador. De acuerdo con estudios previos, la porción que podría ser recuperada es aproximadamente 50% de metales ferrosos y 8% de metales no ferrosos (Aluminio). [6].

Los precios indicados para cada una de estas fracciones son [5]:

- Metales ferrosos = 100 USD/ton
- Metales no ferrosos = 1,500 USD/ton

De acuerdo con los resultados de la Tabla 18. Porcentaje de metales en los residuos del AMVA corresponde a 2.98%, por lo tanto, por cada tonelada que ingresa al proceso, habría una recuperación de 7,353 toneladas de metales ferrosos/año con un ingreso de 735,323 USD/año y una recuperación de 1.176 toneladas de metales no ferrosos/año con un ingreso de 1,764,777 USD/año, para unos ingresos totales de 2.5 MUSD o 5.065 USD/tonelada procesada.

4.2.4 Modelo financiero

Las variables de evaluación financiera (Outputs) son:

TIR: es la tasa de interés o rentabilidad que ofrece una inversión. El criterio de selección dependerá de la tasa de descuento o de oportunidad del proyecto (k). Si la TIR es mayor a k , el proyecto es favorable.

Valor presente: es el valor de los flujos futuros del proyecto traídos al presente teniendo en cuenta una tasa de oportunidad. Si el valor presente neto es mayor a cero, indica que el proyecto es favorable.

Para la estimación de los parámetros de entrada al modelo financiero (inputs) se hizo uso de la Guía para la implementación de tecnologías Waste to Energy en Latinoamérica y el Caribe, publicada por el profesor Nickolas Themelis, quien es un referente a nivel mundial en Waste to Energy y cuenta con más de 10 estudios publicados sobre prefactibilidad y factibilidad de plantas Waste to Energy (4 de ellos en Latinoamérica).

Como ya se especificó inicialmente, el enfoque para el análisis financiero está basado en el cálculo del Valor Presente Neto (VPN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR). Para el propósito de este estudio los costos financieros no fueron incluidos y por lo tanto el VPN y la TIR disminuirán una vez que estos sean incluidos en fase posteriores. Adicionalmente, las variaciones en los flujos de efectivo debido a la inflación u otros factores no fueron incluidos y podrían tener un impacto importante en el análisis.

Los escenarios considerados para la evaluación financiera son los siguientes:

- **Escenario Base:** Precio de venta de la energía sin beneficio por cargo de confiabilidad (63 USD/MWh)
- **Escenario 2:** Precio de venta de la energía a bolsa con beneficio por cargo de confiabilidad (95 USD/MWh)
- **Escenario 3:** Precio de venta de la energía a bolsa con beneficio por cargo de confiabilidad (95 USD/MWh) + beneficios tributarios de reducción de renta (50%) por los 5 primeros años mediante ley 1715.

El periodo de recuperación utilizado es de 20 años (tiempo definido por la CREG para este tipo de proyectos). Las tasas de interés utilizadas en el cálculo del VPN fueron de 5%, 10% y 15%. La razón de seleccionar 5% corresponde a una tasa de interés para proyectos financiados por el gobierno. La razón de utilizar tasas de interés del 10 y 15%, corresponde con proyectos de iniciativa público-privada e iniciativa privada, respectivamente.

La Tabla 44 incluye los resultados de la VPN y TIR para los escenarios simulados a tasas de interés de 5, 10 y 15%.

Tabla 44. Resultados de VPN y TIR para tasas de interés de 5%, 10% y 15%

Tasa de interés/oportunidad (ti/k)				
Escenario	VPN ti= 5% Millones USD	VPN ti= 10% Millones USD	VPN ti= 15% Millones USD	TIR (tasa anual)
Base	-273.13	-296.03	-261.69	-9%
Escenario 2	-178.74	-231.54	-261.69	-2%
Escenario 3	-103.86	-165.47	-200.64	0.4%

Como se puede observar en la tabla anterior, la TIR en el escenario base y el escenario 2, es negativa lo cual indica que ambos escenarios no son viables bajo el modelo de costos e ingresos considerado. Por el contrario, el escenario 3 podría ser viable si la tasa de interés/oportunidad está por debajo del 0.4%.

Con el fin de llevar a cabo un análisis de sensibilidad, se calculará el ingreso por tasa de aprovechamiento (USD/ton) mínimo requerido para que el proyecto pueda llegar al punto de equilibrio (VPN=0) para los 3 escenarios y las 3 tasas de interés/oportunidad previamente definida (5,10 y 15%). En la Tabla 45. Se pueden observar los costos de las tarifas mínimas requeridas.

Tabla 45. Tarifa aplicada requerida para tasas de interés del 5, 10 y 15%.

Tarifa aplicada (USD/ton)			
Escenario	VPN ti= 5% Millones USD	VPN ti= 10% Millones USD	VPN ti= 15% Millones USD
Base	71.2	105.9	145.4
Escenario 2	50.74	85.47	124.9
Escenario 3	31.3	57	86.2

Como se puede observar en la tabla anterior, el incremento requerido sobre el precio actual de las tarifas de disposición de residuos que podrían hacer viable alguno de los escenarios planteados, no son razonables, dado que, en el mejor de los casos, esta tasa de aprovechamiento es 3 veces la tarifa actual (un incremento del 300%), lo cual con base en las políticas públicas actuales no es posible realizar.

De acuerdo con los anteriores resultados y considerando que la CREG (resolución 095 del 2015) estableció la metodología para el cálculo de la tasa interna de retorno (11.8%) que se debe aplicar a los proyectos que involucren distribución de energía eléctrica en el sistema interconectado nacional.

Con base en los resultados anteriores y lo definido por la CREG se hace necesario una estrategia de financiación que articule recursos públicos o no reembolsables (Banca multilateral, por ejemplo). De los escenarios analizados, la TIR más alta es de 0.4 %, tasa de rentabilidad que no es lo suficientemente atractiva, comparada con una tasa del 11.8 %.

Según lo anterior, se plantean escenarios en los cuales se consiga financiar parte de la inversión inicial mediante recursos públicos o no reembolsables, tal como se puede observar en la Tabla 46.

Tabla 46. Escenarios de rentabilidad con financiamiento a la inversión inicial a través de recursos públicos o no reembolsables.

Porcentaje de financiamiento requerido	
Escenario	% financiamiento/TIR
Base	87.5%/12%
Escenario 2	71%/12%
Escenario 3	61%/12%

Como se observa en la tabla anterior, el escenario 1 obtiene una rentabilidad mayor al 11,8 % con al menos el 87.5 % (302 Millones USD) de financiamiento de la inversión inicial a través de recursos no reembolsables. El escenario 2 obtiene una rentabilidad mayor al 11,8 % con una financiación de la inversión inicial por encima del 71 % (245.2 millones USD) y el escenario 3 obtiene una rentabilidad mayor al 11.8 % con una financiación a través de recursos no reembolsables de al menos el 61 % (182 millones USD). Teniendo en cuenta los resultados financieros y los esquemas de financiación planteados, se concluye que el escenario más viable financieramente es el escenario 3, y para que el proyecto sea favorable para los inversionistas, es decir, que para que la tasa de retorno sea mayor al 11.8 % se necesitarán recursos no reembolsables por un valor de 182 MUSD, correspondientes al 61 % del total de la inversión inicial o en su defecto buscar un nuevo esquema de ingresos, incentivos tributarios, bonos que promuevan la inversión en fuentes no convencionales de energías alternativas o incentivos tributarios que ayuden a viabilizar este tipo de proyectos.

5 Sumario y conclusiones

Sumario

- Es claro que se deben implementar modelos de gestión de residuos diferentes a los actuales, en la próxima década el costo de ampliar y construir nuevos vertederos le podría costar a los habitantes del AMVA, cerca de 1 billón de pesos colombianos (COP) en una solución que no es estructural o definitiva. Costo que equivaldría a un 20% del presupuesto anual de la gobernación de Antioquia (5,068 billones – 2021).
- Los países pertenecientes a las regiones con mayor generación de RSM per cápita (OCDE) ya están o tienen implementado modelos de aprovechamiento de RSM diferentes a los vertederos a cielo abierto.
- El enfoque de gestión de RSM utilizado por Colombia debe tener un cambio radical hacia un modelo de “jerarquía de los residuos”, debido a que el modelo colombiano considera como primera alternativa la disposición en rellenos sanitarios, lo cual es totalmente opuesto a los modelos de gestión más utilizados a nivel mundial en los países desarrollados.
- El reciclaje y los procesos WTE no son alternativas mutuamente excluyentes y competitivas, por el contrario, son actividades complementarias, ya que el reciclaje previo al aprovechamiento de las tecnologías WTE, permite mejorar el poder calorífico del residuo y de esta manera mejorar la eficiencia del proceso WTE.
- La tecnología de incineración es la que permite obtener una mayor reducción del volumen total de los RSM (90% aproximadamente), lo cual impacta directamente sobre la vida útil de los rellenos sanitarios, prolongando la vida de estos entre 9 -10 veces más.
- De acuerdo con las proyecciones para el año 2030 cerca del 60% de los RSM generados, no tendrán un lugar para su disposición final, lo cual nos lleva a plantearnos seriamente nuevos modelos de gestión y aprovechamiento de los residuos, que permitan hacer frente a esta creciente generación de residuos de una manera sostenible en el tiempo
- De acuerdo con el estudio realizado por el BID es necesario eliminar barreras normativas o implementar mecanismos para permitir que la tarifa del servicio público de aseo incluya

el costo de técnicas como las tecnologías WTE, cuando su costo sea superior al de disposición final en relleno sanitario y en tamaños de mercado donde sean viables (> 300.000 ton/año).

- En el PGIRS 2017-2030 del AMVA no se tienen planes o estrategias regionales que busquen el aprovechamiento térmico de los RSM, sino que, las estrategias planteadas para la gestión integral de los RSM están enfocadas en la separación en la fuente, el reciclaje y la disposición final en relleno sanitario.
- El PCI reportado para los RSM del subsector no-residencial supera los 7000 kJ/kg recomendados en la literatura como energía mínima viable para tecnologías WTE de características térmicas.
- El modelo desarrollado tiene un gran ajuste con respecto a los resultados obtenidos por [36] y los datos reales operativos reportados por los mismos autores para la planta de Lurgie Energie, por esta razón se considera que el modelo es apto para obtener los flujos de masa y energía, al igual que la potencia eléctrica generada en el proceso WTE de incineración con base en las consideraciones planteadas en este estudio.
- El modelo desarrollado presenta un porcentaje de desviación bajo respecto a los resultados obtenidos con modelos cuya tecnología es diferente a la incineración, el porcentaje de desviación es bajo para un estudio de pre-factibilidad, de acuerdo con la guía de estimación de costos de la Asociación Americana de Ingeniería de Costos (AACE por sus siglas en inglés), la cual establece para una fase de estudio de pre-factibilidad un error permitido de +/- 30%.
- Los escenarios 3 y 4 presentaron potencias térmicas específicas de acuerdo a los estándares internacionales de plantas operativas a nivel mundial.
- La potencia eléctrica específica obtenida en los escenarios 1 y 2, está más cerca de los rendimientos de las plantas operativas de EE. UU. (0.482 MW/ton y 0.471 MW/ton, respectivamente) respecto a 0.55 MW/ton.
- La potencia eléctrica específica obtenida en los escenarios 3 y 4 son similares a las reportadas en instalaciones más modernas/Europa (0.736 MW/ton y 0.601 MW/ton, respectivamente).
- Luego de analizar factores como viabilidad de los escenarios a largo plazo, calidad de los residuos, poder calorífico, generación de potencia térmica y eléctrica, menor generación

de cenizas e inquemados y volumen de disposición de residuos. Se concluye que el escenario 3 es el más apto para la etapa de modelo financiero, de acuerdo con las consideraciones planteadas en este estudio.

- De acuerdo con la matriz de evaluación propuesta por el decreto 1077/2015 la ubicación más apropiada para la ubicación de la planta WTE corresponde a la ubicación de El Túnel.
- De acuerdo con las estimaciones realizadas sobre el CAPEX de inversión, se obtuvo un costo específico (692 USD/ton) similar a los reportados en estudios anteriores para otros países en Latinoamérica (670, 595 y 750 USD/ton).
- De acuerdo con los resultados del modelo financiero, los escenarios y las tasas de interés consideradas, se puede observar que los escenarios 1 y 2 no son viables, mientras que el escenario 3 solo es viable si la tasa de interés/oportunidad es inferior al 0,4%.

Conclusiones

- De acuerdo a los resultados del modelo financiero se puede observar que, bajo las consideraciones expuestas en esta tesis, el esquema de ingresos e impuestos actual de este tipo de iniciativas y las tasas de oportunidad típicas consideradas para un proyecto 100% publico (5%), alianza público-privada (10%) e iniciativa 100% privada (15%) el proyecto solo sería atractivo financieramente si la tasa de interés/oportunidad es inferior a 0.4%, la tarifa de tasa de aprovechamiento de los residuos es 3 veces la tarifa actual (incremento del 300%) o se logran obtener recursos no reembolsables equivalentes al 61% de la inversión inicial del proyecto (182 millones USD). En el primero de los casos no sería posible adquirir una tasa de interés tan baja ni para el sector publico ni para el sector privado en el sector financiero. En el segundo de los casos la tarifa de aprovechamiento no es razonable y de realizar un aumento, esto podría generar mucho descontento publico y tener un alto costo político, adicionalmente, con base en las políticas publicas actuales no es posible realizar dicho aumento. El último de los casos es quizás el más viable, dado que se podría acceder a recursos no reembolsables a través de organismos multilaterales como el BID o la CFI (Corporación Financiera Internacional) o recursos no reembolsables del gobierno como una apuesta de País a fin de ayudar a mitigar una problemática que aqueja a las grandes ciudades del mundo.

Por lo anterior, es posible concluir que bajo las condiciones actuales no es financieramente viable invertir en una planta WTE tanto para el sector público como para el sector privado, a menos que en el mediano-largo plazo se busque un esquema mixto de ingresos (aumento en las tarifas de aprovechamiento, aumento de la tarifa de la energía), incentivos tributarios (una mayor reducción en el impuesto de renta para estas iniciativas), bonos que promuevan la inversión en fuentes no convencionales de energías alternativas, fuentes de financiamiento con bajas tasas de interés o fondos no reembolsables que puedan viabilizar financieramente este tipo de proyectos.

5.1 Recomendación trabajo futuro

Como parte de trabajos futuros se recomienda:

- Realizar las fases de ingeniería básica-conceptual a fin de obtener un layout de planta (mejor estimación del área requerida y costos de adquisición de terreno), obtener hoja de especificaciones técnicas para equipos principales y auxiliares y posteriormente poder obtener cotizaciones presupuestales que permitan ajustar de manera mas precisa el CAPEX obtenido inicialmente.
- Detallar las fuentes y programas de financiamiento nacional e internacional mediante los cuales se podrían obtener créditos o fondos no reembolsables con el objetivo de ayudar a viabilizar financieramente el proyecto.

Referencias

- [1] D. Hoornweg y P. Bhada, «What a Waste. A Global Review of Solid Waste Management,» *Urban development series knowledge papers*, 2012.
- [2] D. Hoornweg, T. Bhada y P. Kennedy, «Waste production must peak this century,» *Nature*, 2013.
- [3] Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, «Disposición final de residuos sólidos urbanos - Informe Nacional,» 2015.
- [4] World Energy Council, «World Energy Resources,» *World Energy Resources*, 2016.
- [5] A. Estrada Wiechers y N. Themelis , «Pre-feasibility study of using the Circulating Fluid Bed (CFB) waste-to-energy technology in Mexico City,» Department of Earth and Environmental Engineering, 2015.
- [6] Themelis, N. J., Elena, M., Barriga, D., Estevez, «Guidebook for the application of waste to energy technologies in Latin America and the Caribbean,» EARTH ENGINEERING CENTER/ COLUMBIA UNIVERSITY, Columbia, 2013.
- [7] N. Ganfer, «MSW Management in the City of Buenos Aires , Argentina and Potential for a Waste-To-Energy Plant,» 2011.
- [8] L. Karlsson y T. Jonsson, «Pre-feasibility study of a Waste to Energy plant in Santiago de Chile,» 2012.
- [9] P. Weinstein, «Waste-To-Energy As A Key Component Of Integrated Solid Waste Management For Santiago, Chile: A Cost-Benefit Analysis,» 2006.
- [10] L. Rodriguez, «Cost-Benefit Analysis Of A Waste To Energy Plant For Montevideo; And Waste To Energy In Small Islands,» 2011.
- [11] P. Santos, «Legal aspects of introducing waste-to-energy (WTE) technology in Sao Paulo State of Brazil: The case studies of URE Barueri and city of Sao Paulo Legal aspects of introducing waste-to-energy (WTE) technology in Sao Paulo State of Brazil,» 2016.

- [12] T. Christensen, «Solid Waste Technology & Management,» *Jhon Wiley*, vol. 1, 2011.
- [13] M. Osorio, «Waste2Energy Medellin,» 22 August 2016. [En línea]. Available: <http://waste2energy-medellin.com/es/tag/waste-to-energy/>. [Último acceso: 2018].
- [14] F. Kreith y G. Tchobanoglous, *Handbook of Solid Waste Management*, 2002.
- [15] PNUMA, «Perspectiva mundial de la gestión de residuos,» Unesco, 2015.
- [16] M. Munster y H. Lund, «Comparing Waste-to-Energy technologies by applying energy system analysis,» de *Waste Management*, 2010, pp. 1251-1263.
- [17] R. Krausz, «A critical study of zero waste to landfill initiatives,» de *All for naught*, 2012.
- [18] E. P. a. Council, «Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain directives,» *Official Journal of the European Union*, 2008.
- [19] Eurostat, «Land Use Overview by NUTS 2 Regions,» 2014.
- [20] H. Beyene y Werkneh, «Current updates on waste to energy (WtE) technologies: a review. Renewable Energy Focus,» *Renewable Energy Focus*, 2018.
- [21] A. Tozlu, E. Ozahi y A. Abusoglu, «Waste to energy technologies for municipal solid waste management in Gaziantep,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015.
- [22] E. Kalogirou, A. Boursalas, M. Klados y N. Themelis, «Waste Management in Greece and Potential for Waste-to-Energy,» *Green Energy and Technology*, 2012.
- [23] A. Liu, F. Ren y W. Lin, «A review of municipal solid waste environmental standards with a focus on incinerator residues,» *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2015.
- [24] V. Chhabra, Y. Shastri y Bhattacharya, «Kinetics of Pyrolysis of Mixed Municipal Solid Waste-A Review,» *Procedia Environmental Sciences*, 2016.
- [25] D. Chen, L. Yin, H. Wang y P. He, «Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review,» *Waste Management*, 2015.

- [26] I. Velghe, R. Carleer y J. Yperman, «Study of the pyrolysis of municipal solid waste for the production of valuable products,» *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2011.
- [27] U. Arena, «Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review,» *Waste Management*, 2012.
- [28] ISWA, «Waste-to-Energy State-of-the-Art-Report,» 2012.
- [29] Deltaway Energy, «Deltaway Energy,» 10 September 2017. [En línea]. Available: <http://www.deltawayenergy.com/wte-tools/wte-anatomy/>.
- [30] S. Wood, Fanning M, M. Venn y K. Whiting, «Review of state-of-art waste to energy technologies.,» 2013.
- [31] Hitachi Zosen Inova AG, «Hitachi Zosen Inova AG,» 10 September 2018. [En línea]. Available: http://www.hz-inova.com/cms/en/home?page_id=277&lang=fr.
- [32] Z. Shareefdeen, A. Elkamel y S. Tse, «Review of current technologies used in municipal solid waste-to-energy facilities in Canada,» *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2015.
- [33] T. Michaels, «Energy Recovery Council directory of waste-to-energy facilities - United States,» Energy Recovery Council, 2014.
- [34] Energy Answer, «Processed Refuse Fuel,» 2012. [En línea]. Available: http://www.energyanswers.com/technologies/processed_refuse_fuel/index.php.
- [35] S. Cimini, M. Prisciandaro y D. Barda, «Simulation of a waste incineration process with flue-gas cleaning and heat recovery sections using Aspen Plus,» *Waste Management*, vol. 25, pp. 171-175, 2005.
- [36] E. Jannelli y M. Minutillo, «Simulation of the flue gas cleaning system of an RDF incineration power plant.,» *Waste Management*, pp. 684-690, 2007.
- [37] P. Trop y D. Goricanec, «The evaluation of heat production using municipal biomass co-incineration within a thermal power plant,» *Energy*, pp. 140-147, 2016.
- [38] X. Huo, J. Zhang, C. Dong y Y. Yang, «Simulation of co-combustion of waste with sludge for power generation by aspen plus,» de *Asia Pacific Power and Energy Engineering Conference*, 2010.

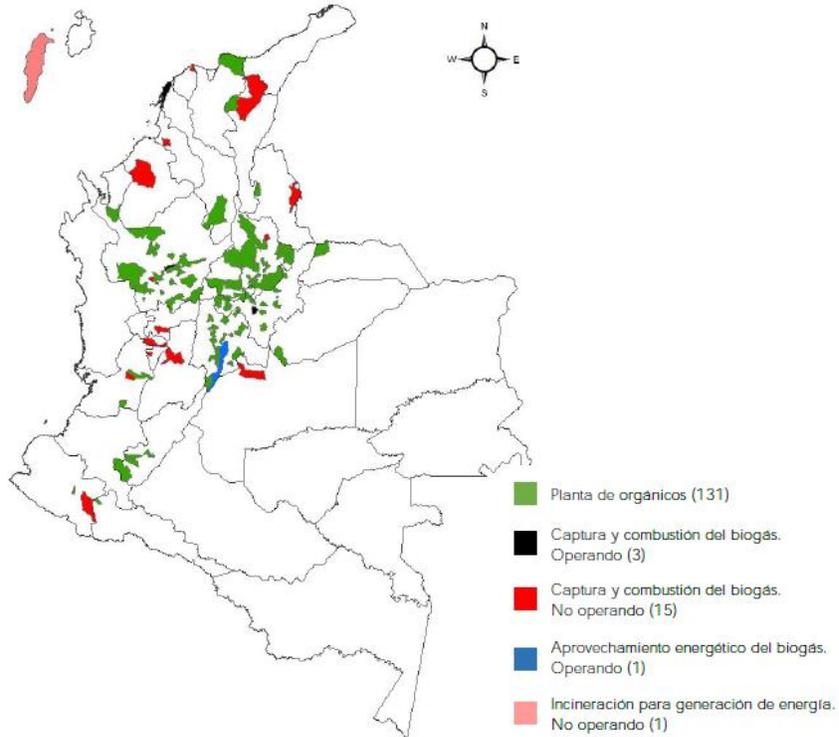
- [39] E. Grieco y A. Poggio, «Simulation of the influence of flue gas cleaning system on the energetic efficiency of a waste-to-energy plant,» *Applied Energy*, 2009.
- [40] G. Ding, B. He, Y. Cao y C. Wang, «Process simulation and optimization of municipal solid waste fired power plant with oxygen/carbon dioxide combustion for near zero carbon dioxide emission,» *Energy conversion and Management*, 2018.
- [41] K. Jana y S. De, «Biomass integrated combined power plant with post combustion CO₂ capture,» *Energy Procedia*, pp. 166-176, 2014.
- [42] DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN, «Documento CONPES 3874, POLÍTICA NACIONAL PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS,» 2016.
- [43] J. Bi y Y. Moriguichi, «The circular economy: A new development strategy in China,» *Journal of Industrial Ecology*, pp. 4-8, 2006.
- [44] AMVA, «OBJETIVOS Y METAS ESTRATÉGICAS DEL PGIRS REGIONAL DEL VALLE DE ABURRÁ 2017 - 2030,» 2017.
- [45] Acodal, «Criterios técnicos para diseño de rutas selectivas y selección de equipos,» 2017. [En línea]. Available: <http://www.acodal.org.co/>.
- [46] &. S. d. m. A. Secretaría de Gestión y Control Territorial, «Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos - PGIRS 2016-2027,» Medellín, 2015.
- [47] Ali Khan y Abu Ghararah, «New Approach of Estimating Energy Content of Municipal Solid Waste,» *Journal of Environmental Engineering*, pp. 376-382, 1991.
- [48] S. KUNITOSHI, «Método Sencillo de Análisis de los Residuos Sólidos,» *CEPIS-OPS*, 1998.
- [49] Ainie Khuriati y Wahyu Setia Budi, «MODELING OF HEATING VALUE OF MUNICIPAL SOLID WASTE BASED ON ULTIMATE ANALYSIS USING MULTIPLE STEPWISE REGRESION LINEAR IN SEMARANG,» *Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 12, pp. 2870-2876, 2017.
- [50] Subsecretaria de Servicios Públicos, «Informe de la caracterización de residuos sólidos en el sector no residencial del municipio de Medellín y sus cinco corregimientos,» Medellín, 2019.
- [51] Y.F. Chang, C.J. Lin y J.M. Chyan, «Multiple regression models for the lower heating value

- of municipal solid waste in Taiwan,» *Journal of Environmental Management*, pp. 891-899, 2007.
- [52] Cooperativa de servicios integrales de Colombia COSEICO, *Plan Nacional De Gestión Integral De Residuos Sólidos*, 2016.
- [53] Oficina de comunicaciones Alcaldía de Sabaneta, 2014. [En línea]. Available: <http://www.sabaneta.gov.co/SalaPrensa/Paginas/aseo.aspx>.
- [54] E. Jannelli y M. Minutillo, «Simulation of the flue gas cleaning system of an RDF incineration power plant,» *Waste Management*, pp. 684-690, 2007.
- [55] MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, «Estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas,» MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, Colombia, 2008.
- [56] M. Radojevic, «Reduction of nitrogen oxides in the flue gas,» *Environmental Pollution*, pp. 685-689, 1998.
- [57] Yang, Y.B, Goh, Y.R y Zakaria, R, «Mathematical modelling of MSW incineration on a travelling bed,» *Waste Management*, p. 369–380, 2002.
- [58] Aspen Plus 12.1, «User Guide,» Aspen Technology Inc, 2000.
- [59] A. Bradley, «Modeling non-equilibrium CO oxidation in combustion systems,» Orlando, 2000.
- [60] R. Soutudeh-Gharebaagh, «Simulation of circulating fluidized bed reactors using ASPEN PLUS,» *Fuel*, p. 327–337, 1998.
- [61] D. Guanghao , H. Boshu, C. Yang y W. Chaojun, «Process simulation and optimization of municipal solid waste fired power plant with oxygen/carbon dioxide combustion for near zero carbon dioxide emission,» 2015.
- [62] E. G. EPM, «Programas y proyectos en ejecución,» 25 4 2021. [En línea]. Available: <https://www.emvarias.com.co/corporativo/home/institucional/programas-y-proyectos-en-ejecucion>.
- [63] EPA, EPA AIR POLLUTION CONTROL COST MANUAL, North Carolina, 2002.

- [64] COMISIÓN DE REGULACIÓN DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO, «Guía Metodológica de costos y tarifas para el servicio público de aseo,» Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2020.
- [65] Unidad de Planeación Minero Energetica - UPME, «Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia,» Bogota, 2015.
- [66] MedellinComoVamos, «Medellin Como Vamos,» 21 04 2021. [En línea]. Available: <https://www.medellincomovamos.org/node/18687>.
- [67] Empresas Varias - EMVARIAS, «EMVARIAS Grupo EPM,» 30 Mayo 2021. [En línea]. Available: <https://www.emvarias.com.co/corporativo/home/institucional/programas-y-proyectos-en-ejecucion>.
- [68] G. E. -. EMVARIAS, «TARIFAS SEGUNDO SEMESTRE DE 2021,» 31 Julio 2021. [En línea]. Available: https://www.emvarias.com.co/Portals/7/Clientes%20y%20usuarios/servicios%20y%20tarifas/Tarifas%202021/TARIFAS_SEGUNDO_SEMESTRE_2021_EMVARIAS.pdf?ver=2021-08-02-160736-810.
- [69] A. Poggio y E. Grieco, «Influence of flue gas cleaning system on the energetic efficiency and on the economic performance of a WTE plant,» 2010.
- [70] A. Wiechers, «Pre-feasibility study of using the circulating fluid bed (CFB) - Waste to Energy technology in Mexico-City,» 2015.

Anexos

Anexo 1. Infraestructura de tratamiento y aprovechamiento de residuos en el país, adaptada de (Departamento Nacional de Planeación, 2016)



Anexo 2. Mapa de zonificación y estratificación del municipio de Medellín y sus corregimientos. Imagen tomada de (EMPRESAS VARIAS DE MEDELLÍN S.A E.S.P, 2015)

