	ESTIMACIÓN DE LA REDUCCIÓN DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO ASOCIADAS A LA VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DEL RELLENO SANITARIO DOÑA JUANA EN BOGOTÁ D.C.		Código: IN-IN-001 Versión: 01
	Proceso: Proyecto de grado	Fecha de emisión: 05 de abril del 2017	Fecha de versión:

**ESTIMACIÓN DE LA REDUCCIÓN DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO
 INVERNADERO ASOCIADAS A LA VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE LOS
 RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DEL RELLENO SANITARIO DOÑA JUANA EN
 BOGOTÁ D.C.**

IVONNE LORENA VELANDIA SÁNCHEZ

ESCUELA COLOMBIANA DE CARRERAS INDUSTRIALES
FACULTAD INGENIERÍA
PROGRAMA INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.

2017

ESTIMACIÓN DE LA REDUCCIÓN DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO
INVERNADERO ASOCIADAS A LA VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE LOS
RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DEL RELLENO SANITARIO DOÑA JUANA EN
BOGOTÁ D.C.

IVONNE LORENA VELANDIA SÁNCHEZ

Proyecto de grado como requisito parcial para optar por el Título de Ingeniero
Ambiental

William Evelio Rodríguez Delgado

MSc. Energías Renovables y Eficiencia Energética

ESCUELA COLOMBIANA DE CARRERAS INDUSTRIALES

FACULTAD INGENIERÍA

PROGRAMA INGENIERÍA AMBIENTAL

BOGOTÁ D.C.

2017

TABLA DE CONTENIDO

1. Problema De Investigación	10
Objetivos De La Investigación	12
2.1 Objetivo General	12
2.2 Objetivos Específicos	12
3. Justificación y Delimitación	14
3.1 Justificación.....	14
3.2 Delimitación.....	15
4. Marco De Referencia	16
4.1 Marco Teórico	16
4.1.1. Tipo del Residuo y sus propiedades	16
4.1.2 Tecnologías de conversión térmica.....	18
4.1.3 Estimación de emisiones en un Relleno Sanitario	26
4.1.4 Estimación de emisiones de un Sistema de Incineración	28
4.2 Marco Conceptual	30
4.3 Marco Legal	33
4.4 Marco Histórico	35
5. Metodología	37
5.1 Identificar el tipo de residuos sólidos dispuestos en el RSDJ	40
5.2 Evaluación De Las Tecnologías De Conversión Térmica	46
Matriz cruzada.....	47
5.2.1. Residuo Aprovechable	48
5.2.2 Pre tratamiento.....	49
5.2.3 Productos	50
5.2.4 Temperatura de operación	51
5.2.5 Capacidad de tratamiento (Tonelada/día)	52
5.2.6 Eficiencia	53
5.2.7. Vida útil	55
5.2.8 Costos	56
5.2.9. Porcentaje de reducción de volumen del residuo.....	59
5.2.10 Emisiones de Gases y partículas	60
5.3 Capacidad y Eficiencia Eléctrica de la tecnología priorizada	61
5.4 Estimación Reducción de Emisiones	62

6. Resultados y Análisis de resultados.....	73
6.1 Cantidad y residuos susceptibles al aprovechamiento energético en el RSDJ	73
6.1.1 Tendencia De los Residuos	77
6.1.2. Contenido de Humedad	79
6.1.3 Potencial de Generación de energía de los RSU	81
6.2 Matriz de evaluación de las Tecnologías	83
6.3 Funcionamiento y Capacidad De La Planta Incineradora	88
6.3.1 Eficiencia De La Tecnología De Incineración.....	89
6.3.2 Generación De Energía Eléctrica.....	90
6.3.4 Porcentaje de contribución a nivel Nacional y Bogotá	99
6.4 Estimación de la Reducción de Emisiones De Gases De Efecto Invernadero Del Relleno Sanitario Doña Juana Respecto Al Sistema De Incineración De Lecho Fluidizado Rotativo.....	105
Fracción de CH ₄ en el gas de vertedero generado (F).....	108
6.5 Estimación de emisiones del Sistema de Incineración.....	109
Conclusiones.....	114
Recomendaciones.....	115
Referencias	116


	ESTIMACIÓN DE LA REDUCCIÓN DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO ASOCIADAS A LA VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DEL RELLENO SANITARIO DOÑA JUANA EN BOGOTÁ D.C.		Código: IN-IN-001 Versión: 01
	Proceso: Proyecto de grado	Fecha de emisión: 05 de abril del 2017	Fecha de versión:

TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Relleno Sanitario Doña Juana - Bogotá D.C.....	15
Ilustración 2. Clasificación de los residuos de acuerdo a su fuente de generación.....	17
Ilustración 3. Incineración en horno de parrilla.....	20
Ilustración 4. Flujo de recuperación de energía utilizando turbina de vapor.....	22
Ilustración 5. Diagrama de procesos planta de pirolisis.	24
Ilustración 6. Proceso de gasificación.	25
Ilustración 7. Valores Por Defecto Para Contenidos De Materia Seca, DOC, Total De Carbono Y Fracción De Carbono Fósil En Varios Componentes De DSM	68
Ilustración 8. Cantidad Anual de Residuos Dispuestos año 2015.	73
Ilustración 9. Cantidad De Residuos Sólidos Dispuestos en el RSDJ Año 2015.	74
Ilustración 10. Cantidad de Residuos Dispuestos en el primer semestre del año 2016.75	
Ilustración 11. Cantidad De Residuos Sólidos Dispuestos en el RSDJ Año 2016	76
Ilustración 12. Tendencia del Caucho y Cuero año 2015.....	77
Ilustración 13. Tendencia del Cartón año 2015.....	78
Ilustración 14. Tendencia del Plástico año 2015	78
Ilustración 15. Tendencia de la materia orgánica año 2015	79
Ilustración 16. Peso Base Seca de Los Residuos Sólidos año 2015 (Ton/mes).....	80
Ilustración 17. Peso Base Seca de Los Residuos Sólidos año 2016 (Ton/mes).....	80
Ilustración 18. Potencial de generación de energía de los residuos sólidos base seca AÑO 2015	81
Ilustración 19. Método 2 Potencial de generación de energía de los residuos sólidos base seca año 2015.....	82
Ilustración 20. Producción de energía para el año 2015 con una eficiencia del 28%....	91
Ilustración 21. Producción de energía para el año 2015 con una eficiencia del 20.6%. 92	
Ilustración 22. Producción de energía para el año 2015 con una eficiencia del 23.7%. 93	
Ilustración 23. Gráfica de eficiencia máxima, mínima y promedio para la generación de energía eléctrica estimada para cada mes del año 2015	94
Ilustración 24. Gráfica de eficiencia máxima, mínima y promedio para la generación de energía eléctrica estimada para los meses del primer semestre del año 2016.....	95
Ilustración 25. Producción de energía para el primer semestre del 2016 con una eficiencia del 28%	96
Ilustración 26. Producción de energía para el primer semestre del 2016 con una eficiencia del 20.6%	97
Ilustración 27. Producción de energía para el primer semestre del 2016 con una eficiencia del 23.7%	98

Ilustración 28. Composición y cantidad (Gg/mes) de residuos sólidos urbanos depositados en el Relleno Sanitario Doña Juana en el año 2015.	105
---	-----

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales Componentes De Una Planta Incineradora	21
Tabla 2. Diseño Metodológico	37
Tabla 3. Contenido De Humedad De los Residuos	42
Tabla 4. Contenido energético de los RSU	44
Tabla 5. Puntuación respecto a los residuos susceptibles a aprovechamiento térmico	48
Tabla 6. Residuos Aprovechables por las diferentes tecnologías	48
Tabla 7. Rango de Evaluación	49
Tabla 8. Requisitos de <i>pre tratamiento</i> de los residuos.....	50
Tabla 9. Rango de evaluación.....	50
Tabla 10. Productos	50
Tabla 11. Rango de Evaluación	51
Tabla 12. Temperatura estimada por diferentes referencias bibliográficas.	52
Tabla 13. Rango de Evaluación	52
Tabla 14. Rango de capacidad de tratamiento típico de las tecnologías	53
Tabla 15. Rango de Evaluación	53
Tabla 16. Eficiencias de las Tecnologías	54
Tabla 17. Rango de Evaluación	54
Tabla 18. Vida Útil de la Tecnología.....	55
Tabla 19. Rango de Evaluación	55
Tabla 20. Rango de Evaluación	58
Tabla 21. Porcentaje de Reducción del Volumen de RSU	59
Tabla 22. Rango de Evaluación	60
Tabla 23. Contribución de las tecnologías respecto a las emisiones	60
Tabla 24. Rango de Evaluación	61
Tabla 25. Valores Por Defecto Para Contenidos De Materia Seca, DOC, Total De Carbono Y Fracción De Carbono Fósil En Varios Componentes De DSM	64
Tabla 26. Clasificación de los SEDS y factores de corrección de metano (MCF)	66
Tabla 27. Datos para determinar las emisiones de CO ₂	69
Tabla 28. Valores de ecuación para la Estimación de emisiones	69
Tabla 29. Costos de los Sistemas Evaluados	83
Tabla 30. Matriz de evaluación de las tecnologías de conversión térmica.....	87
Tabla 31. Indicadores Oferta Eléctrica Mensual En El Año 2015 Para Colombia	99
Tabla 32. Indicadores Oferta Eléctrica Mensual En El primer semestre del año 2016 Para Colombia	100
Tabla 33. Reporte Del Consumo Eléctrico Mensual Para Bogotá D.C En El Año 2015 - Total Residencial + Total No Residencial.....	100
Tabla 34. Reporte Del Consumo Eléctrico Mensual Para Bogotá D.C En El primer semestre del año 2016 - Total Residencial + Total No Residencial	102

Tabla 35. Porcentaje de contribución de energía eléctrica producida por los RSU respecto al consumo de energía eléctrica de Bogotá y la oferta de energía eléctrica de Colombia mensual y anual para el año 2015	103
Tabla 36. Porcentaje de contribución de energía eléctrica producida por los RSU respecto al consumo de energía eléctrica de Bogotá y la oferta de energía eléctrica de Colombia mensual y total para el primer semestre del 2016.....	104
Tabla 37. Fracción de tipo de desecho i por categoría de desecho – 2015	106
Tabla 38. Fracción de carbono orgánico degradable en los desechos brutos, Gg de C/Gg de desechos.....	107
Tabla 39. Masa del DDOC depositado para los meses del año 2015	107
Tabla 40. Potencial de generación de CH ₄ , Gg de CH ₄ y su equivalente en Toneladas de CO ₂ para el año 2015.....	108
Tabla 41. Estimación de emisiones CO ₂	109
Tabla 42. Estimación de emisiones de CH ₄ y su equivalente en Toneladas de CO ₂ para el año 2015	110
Tabla 43. Estimación de emisiones de N ₂ O y su equivalente en Toneladas de CO ₂ para el año 2015	111
Tabla 44. Emisiones de E.E para Colombia y Bogotá en el año 2015	112
Tabla 45. Emisiones totales de CO ₂ estimadas a partir de la incineración de RSU por lecho fluidizado rotativo.....	113

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Cálculo de la cantidad de residuo producida (CRP)	41
Ecuación 2. Peso de la fracción de agua contenida en cada tipo de residuo (PACR). .	42
Ecuación 3. Peso base Seca Residuos Sólidos (PBRs).....	44
Ecuación 4. Contenido energético cada tipo de residuo en base seca (CEBSR)	45
Ecuación 5. Contenido energético en base seca de los residuos sólidos (CEBSR).	46
Ecuación 6. Potencial Energético de los Residuos (PERS)	46
Ecuación 7. Equivalencia de energía y calor.....	46
Ecuación 8. Estimación de Costos De Inversión Planta Incineradora (CIPI).....	57
Ecuación 9. Estimación de Costos de operación Planta Incineradora (COPI).	57
Ecuación 10. COD disuelto a partir de los datos sobre la eliminación de desechos.	62
Ecuación 11. Transformación de DDOC _m en Lo	63
Ecuación 12. Estimación del DOC con los valores de contenido de carbono por defecto	63
Ecuación 13. Estimación de las emisiones de CO ₂ basada en la composición de los DSM (ECO ₂).....	67
Ecuación 14. Estimación de las emisiones de CH ₄ basada en la cantidad total de desechos quemados	70
Ecuación 15. Estimación de las emisiones de N ₂ O basada en la entrada de desechos a los incineradores	71
Ecuación 16. Reducción de emisiones.....	72
Ecuación 20. Tiempo de Funcionamiento de la Planta Incineradora.	88
Ecuación 21. Capacidad mínima de la Planta Incineradora.	88
Ecuación 22. Eficiencia Global 1	89
Ecuación 23. Eficiencia Global 2	89
Ecuación 24. Eficiencia P	90

1. Problema De Investigación

El aumento exponencial de la población, el desarrollo de actividades de origen antropogénico que generan continuamente residuos y la constante presión del hombre sobre los recursos fósiles, se traduce como la conjugación de causas de un eminente problema (PNUMA, 2007). La producción per cápita de residuos en América Latina se estima entre 0,5 y 1 kilogramo diario, proporcional a factores como el consumo, poder adquisitivo, costumbres, entre otros (Noguera & Olivero, 2010), esta cifra es significativa ya que para el año 2016 la población era de 632.959.079 personas en América Latina y el Caribe, donde los países más poblados de acuerdo al Banco Mundial en el año 2016 fueron Brasil y Colombia.

En Colombia la problemática ambiental de los residuos sólidos ha ido progresando en medida a la urbanización y por lo tanto al aumento de la población. Se ha regulado y reglamentado con el tiempo la gestión de los residuos sólidos, contemplando la recolección, transporte, tratamiento y disposición final, la prestación del servicio de aseo es de índole público y por ende responsabilidad de la autoridad soberana, es decir del Estado (Anzola Parra, 2015). La mayor preocupación radica en la disposición final de los residuos sólidos, de acuerdo a un informe de la superintendencia de servicios públicos domiciliarios de los 1.112 municipios de Colombia, sólo 1088 poseen información referente al tipo de disposición de sus residuos, se identificó que únicamente 789 municipios lo hacen en rellenos sanitarios y el resto emplean técnicas inadecuadas de disposición final como los botaderos a cielo abierto, quema, etc. (Superintendencia de Servicios Públicos, 2013).

Los rellenos sanitarios a nivel nacional están consolidados como sistemas adecuados para efectuar la disposición final de los residuos sólidos, *“son una opción económica, amigable con el medio ambiente y segura respecto a otros métodos”* (Noguera & Olivero, 2010), dicha premisa es cuestionada al observar el estado actual de la mayoría de los rellenos sanitarios, específicamente la situación del relleno sanitario Doña Juana ubicado en la ciudad de Bogotá, capital de Colombia.

El relleno sanitario Doña Juana recibe los residuos de cinco municipios y de la ciudad de Bogotá, en el año 2015 se depositaron cerca de 6307,71 ton/día (Superintendencia de Servicios Públicos, 2015). El RSDJ¹ cumple más de 20 años de funcionamiento constante, dejando en evidencia en el transcurso de su operación varias falencias y problemas ambientales persistentes como la proliferación de malos olores, vectores, deslizamientos de los residuos depositados y lixiviados que han afectado a las comunidades aledañas a este (Noguera & Olivero, 2010). Su clausura se proyectó para

¹ Relleno Sanitario Doña Juana

el año 2016, donde se esperaba la disposición de 47.000.000 toneladas de residuos sólidos (Coronado Cárdenas, Sotelo Rojas, & Chávez Porras, 2011).

Este panorama desconcertante de una realidad cada vez más tangible no sólo en Colombia sino en todo el mundo, permite explorar las alternativas optadas por países como China y España, países desarrollados que dado a su estilo de vida y aumento poblacional han implementado la valoración energética como una alternativa en el campo energético y para la disposición final de los residuos. El aprovechamiento energético de los residuos se basa en el principio de *“la sustitución parcial de los combustibles fósiles tradicionales por combustibles derivados de los residuos”* a través de tecnologías y procesos que causen el mínimo impacto en el ambiente o riesgo en la salud humana (Cedano de León, 2013).

La situación descrita y antecedentes preceden a la formulación del siguiente interrogante ¿Cómo contribuye la valorización energética de los residuos sólidos urbanos en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero generados por la actividad operativa del Relleno Sanitario Doña Juana?

Objetivos De La Investigación

2.1 Objetivo General

Estimar la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, asociada a la valoración energética de los residuos sólidos del relleno sanitario Doña Juana.

2.2 Objetivos Específicos

2.2.1. Identificar las características físicas de los residuos sólidos dispuestos en el Relleno Sanitario Doña Juana por medio de información secundaria, con el fin de evaluar su potencial valorización energética.

2.2.2. Identificar y describir los sistemas de valorización o tecnología existentes, especificando las características, eficiencias y costos que permitan establecer un criterio de priorización de dicho sistema de acuerdo a las condiciones del Relleno Sanitario Doña Juana.

2.2.3. Calcular el potencial de generación de energía eléctrica con base en el potencial de energía de los residuos y las características de la tecnología seleccionada, a través de métodos matemáticos que determinen la viabilidad de la alternativa propuesta.

2.2.4. Calcular la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero de las condiciones actuales de disposición de los residuos en el relleno sanitario Doña Juana con respecto a las del sistema de valorización energética propuesto.

3. Justificación y Delimitación

3.1 Justificación

Ante el incremento en la generación de residuos por los hábitos de consumo de la población actual, se ha vislumbrado en estos un valor energético. El presente estudio se realizó con el fin de evaluar la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero por medio del aprovechamiento térmico de los residuos sólidos urbanos del relleno sanitario Doña Juana como una fuente de energía alternativa no convencional.

La valorización energética de los residuos por medio de tecnologías fundamentadas en procesos termoquímicos, busca generar electricidad y disminuir las emisiones del dióxido de carbono (CO₂) y el Metano (CH₄), estos gases se manifiestan de manera natural por la descomposición de la materia orgánica en condiciones aerobias y anaerobias, son gases de efecto invernadero que contribuyen significativamente al fenómeno de cambio climático.

El cambio climático se manifiesta como un aumento de temperatura que experimenta el planeta (0.6 °C en el siglo XX), este fenómeno nos afecta a todos por igual, por lo tanto es una problemática local y global (Barrera, Gómez , & Suárez , 2015). Al inicio del siglo XXI se observó un aumento de 2 °C, provocando variabilidad climática e intensificando los fenómenos climáticos. En el caso de Colombia el fenómeno del niño y el de la niña han causado inundaciones y sequías que afectan la agricultura, causan el deshielo de glaciares, nevados, migraciones de especies, etc. (Barrera, Gómez , & Suárez , 2015). La disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero favorece el cumplimiento del objetivo propuesto por Colombia frente a la reducción para el año 2030 del 20% de las emisiones de GEI² (Barrera, Gómez , & Suárez , 2015).

Así, el documento expone la posible reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, comparando las emisiones producidas por el uso de la tecnología de valorización energética respecto a las emisiones del relleno sanitario por el desarrollo habitual de sus funciones, como un acercamiento inicial desde la ingeniería a esta problemática de la ciudad y el país. También se estimó la cantidad de energía eléctrica que se producirá a partir del aprovechamiento de los residuos sólidos urbanos de Bogotá y el aporte al sistema eléctrico nacional-local.

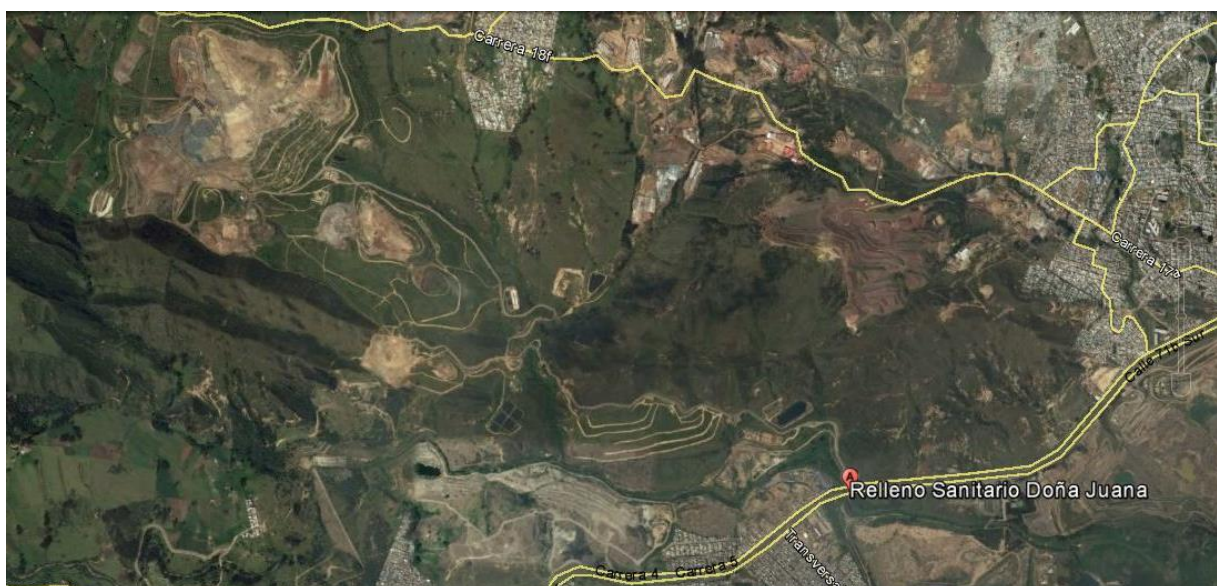
² Gases de efecto invernadero

3.2 Delimitación

El relleno sanitario Doña Juana cuenta con una extensión de 596 hectáreas (García & Padilla, 2014), se ubica al sur oriente de la ciudad de Bogotá Distrito Capital de Colombia y está situado en la localidad de Ciudad Bolívar vía Villavicencio, entre los sectores de Mochuelo Alto y Mochuelo Bajo ($4^{\circ}29'50.59''$ N y $74^{\circ}08'43.28''$ W) (Noguera & Olivero, 2010) ver (ilustración 1).

Con más de 27 años de operación desde su inauguración el primero de noviembre de 1988 y su puesta en marcha en 1989, en la actualidad continua en funcionamiento excediendo su vida útil proyectada de 20 años, se han efectuado obras para su extensión y acondicionamiento prolongando su actividad.

Ilustración 1. Relleno Sanitario Doña Juana - Bogotá D.C



Fuente: Google Earth (2017)

4. Marco De Referencia

4.1 Marco Teórico

La valorización energética de los residuos sólidos urbanos proporciona grandes ventajas en el tema ambiental, porque reduce las emisiones de gases de efecto invernadero, al generar energía eléctrica y térmica con un combustible no fósil (Cerdá, 2009). Dicha alternativa contempla varios aspectos que se deben tener en cuenta para llevar a cabo cualquier proceso o implementar un sistema de valoración energética.

El primer factor a analizar son los residuos sólidos como tal, su origen o fuente de generación, sus características como composición, peso, contenido de humedad y potencial energético (poder calorífico) son variables indispensables y determinantes en el proceso de valorización energética de los residuos.

El segundo factor son los sistemas de valorización y sus procesos termoquímicos, sus principales características o criterios de funcionamiento, ya que cada tecnología demanda condiciones especificar para llevar a cabo el aprovechamiento término de los residuos.

4.1.1. Tipo del Residuo y sus propiedades

La naturaleza o tipo residuo es una variable importante al seleccionar la tecnología, por ejemplo; la tecnología de gasificación se limita a residuos orgánicos con cierto porcentaje de humedad, estos criterios garantizan la eficiencia del sistema, prolongan la vida útil de la tecnología y reducen costos por mantenimientos innecesarios (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2011). De acuerdo a la directiva de la Unión Europea 2008/98/ CE, los residuos orgánicos como, alimentos, textil, papel, cartón y de jardín, son susceptibles a la valorización energética por el sistema de incineración (Cerdá, 2009).

La pesquisa inicial obedece a identificar el origen o fuente de generación de los residuos, ya que el desarrollo de cualquier actividad tiene como producto la generación de residuos sólidos, se identificó que en la ciudad de Bogotá las principales fuentes generadoras son; viviendas, mercados, actividades comerciales e institucionales (Aristizabal & SÁCHICA, 2001). La siguiente ilustración permite visualizar la relación entre la fuente y naturaleza de los residuos.

Ilustración 2. Clasificación de los residuos de acuerdo a su fuente de generación.

Tipo	Fuente	Naturaleza
Domésticos	Casas y edificios, unifamiliares y multifamiliares.	Comida, papel, cartón, plásticos, textiles, cueros, maderas, vidrio, aluminio, residuos especiales y domésticos peligrosos.
Industriales	Industrias de manufactura y producción de bienes.	Aluminio, cartón, papel, plástico, maderas, vidrio, metales, residuos orgánicos, residuos especiales.
Comerciales	Tiendas, restaurantes, hoteles, supermercados y centros comerciales.	Papel, cartón, plásticos, aluminio, madera, vidrio, metales, residuos orgánicos, y residuos peligrosos.
Institucionales	Centros educativos, hospitales, cárceles, universidades y otras.	Papel, cartón, plástico, maderas, vidrio, metales, residuos orgánicos, residuos especiales.
Agrícolas	Cosechas de campo, árboles frutales, viñedos, ganadería y granjas.	Residuos orgánicos, plásticos, cartón, vidrio, residuos peligrosos, envases de plaguicidas.
Construcción	Nuevas construcciones, obras, pavimentos rotos y demoliciones.	Madera, vidrio, concreto, escombros, acero, plástico.
Servicios Distritales	Barrido y limpieza de calles, paisajismo, podas, parques y playas.	Recortes de árboles y plantas, arena, papel, plástico, vidrio, acero.

Fuente: (Coronado Cárdenas, Sotelo Rojas, & Chávez Porras, 2011)

Las propiedades químicas identifican la composición de los residuos a través de métodos como el análisis elemental (GIZ, 1999), su finalidad es determinar los porcentajes de Carbono, Hidrógeno, Oxígeno, Nitrógeno, Azufre y ceniza, para evaluar las posibles emisiones de contaminantes durante el proceso de combustión, haciendo énfasis en contaminantes con compuestos clorados u otros que signifiquen un posible impacto en la calidad del aire (Tchobanoglous, Gestión Integral de Residuos Sólidos Volumen I, 1994).

Las propiedades físicas se relacionan con el peso, humedad y contenido energético de los residuos sólidos. El peso es una propiedad física esencial e intrínseca, se determina con el pesaje de los residuos antes de ingresar al relleno sanitario, posterior a esto, se lleva a cabo un proceso de cuantificación anual de los residuos sólidos dispuestos (Kunitoshi Sakurai , 2000). La cuantificación es una segregación porcentual de los residuos de acuerdo a la naturaleza de estos, en otros términos hace referencia al peso total de los residuos que ingresan al relleno sanitario para su posterior disposición, esta información es de gran importancia ya que identifica la cantidad de residuos que se deben gestionar en la disposición final (Kunitoshi Sakurai , 2000).

Para el aprovechamiento energético de los residuos se debe establecer cuantos residuos y que tipo son susceptibles a este, permitiendo evaluar la viabilidad de las tecnologías y de los procesos térmicos de aprovechamiento (Steinvorth Álvarez & CEGESTI, 2014). De acuerdo a la tecnología y su capacidad, se estipula la cantidad de residuos que serán sometidos al proceso de aprovechamiento energético, entiéndase como toneladas por hora de residuos, por lo que el peso es una variable determinante al establecer la capacidad de la tecnología.

El porcentaje de humedad se establece a partir de la diferencia de la fracción de agua contenida en el residuo respecto al peso del residuo en base húmeda, algunas tecnologías de aprovechamiento sugieren la deshidratación de los residuos para garantizar mayor poder calorífico y mejor eficiencia del sistema (Tchobanoglous, Gestión Integral de Residuos Sólidos Volumen I, 1994). Generalmente el contenido de humedad de los residuos es transferido y posteriormente unificado, la transferencia de humedad de algunos residuos genera la degradación de otros, generalmente el papel absorbe la humedad cedida de los residuos orgánicos (Romero Sánchez, 2007).

El potencial energético de los residuos sólidos se mide por el valor del poder calorífico inferior, se debe entender que el poder calorífico de *“un combustible es la cantidad de energía que produce la combustión de 1 kilo del mismo”* (Castells, 2005). El PCI³ se determina por un análisis elemental del residuo, es la suma del calor desprendido por el combustible, en este proceso se debe restar el hidrógeno que probablemente será consumido por el oxígeno (Castells, 2005).

El poder calorífico expresado en kilocalorías por kilogramo (Kcal/kg), es una de las principales propiedades a considerar para el diseño de las instalaciones o tecnologías con fines de recuperación energética, esta característica varía de acuerdo a la composición de los residuos que se tratarán, ya que cada residuo posee su propio poder calorífico (Romero Sánchez, 2007).

4.1.2 Tecnologías de conversión térmica

Los procesos termoquímicos son la base de los sistemas de valorización energética de los residuos sólidos, permiten reducir el volumen y masa de los residuos de manera significativa y de igual forma la recuperación o aprovechamiento de la energía. Estos procesos de conversión implican reacciones químicas irreversibles, bajo parámetros como la temperatura y condiciones variables de oxidación (MÍGUEZ TABARÉS, 2016)

La clasificación de los procesos de conversión está dada en función del oxígeno, varía su proporción o requerimiento de acuerdo al proceso, por ejemplo ; la combustión o incineración requiere de una cantidad de oxígeno para efectuar una combustión

³ Poder Calorífico Inferior

completa, este proceso emplea la descomposición térmica a través de la oxidación de la materia carbonosa de un combustible o residuo, mientras que el proceso de gasificación requiere condiciones subestequiométricas de oxígeno, dando una combustión parcial que genera un gas combustible (Cid Coffré, 2016). En el documento se contempló los sistemas de valorización que tienen como base procesos termoquímicos.

4.1.2.1 Incineración

Es la tecnología más antigua, aproximadamente han transcurrido 100 años desde su estudio y uso, existen alrededor de 1.100 plantas para aprovechamiento de los residuos sólidos y peligrosos, convirtiéndolo en el sistema de valorización energética más utilizado en la actualidad (Armengol, Grau; Farré, Oriol, 2011).

Al ser una tecnología bastante estudiada y ensayada cuenta con más de 10 subdivisiones en el proceso, asegurando un tratamiento eficiente y buen manejo de emisiones (Armengol, Grau; Farré, Oriol, 2011).

La incineración es un proceso exotérmico en el cual se lleva a cabo una oxidación completa, el agente oxidante (oxígeno) es abundante, este proceso funciona a una temperatura de combustión estándar que está entre los 850 °C y los 1.100 °C, como en todo proceso se generan remanentes, los cuales no son aprovechables y en este caso al no ser tratados pueden ser contaminantes (Armengol, Grau; Farré, Oriol, 2011).

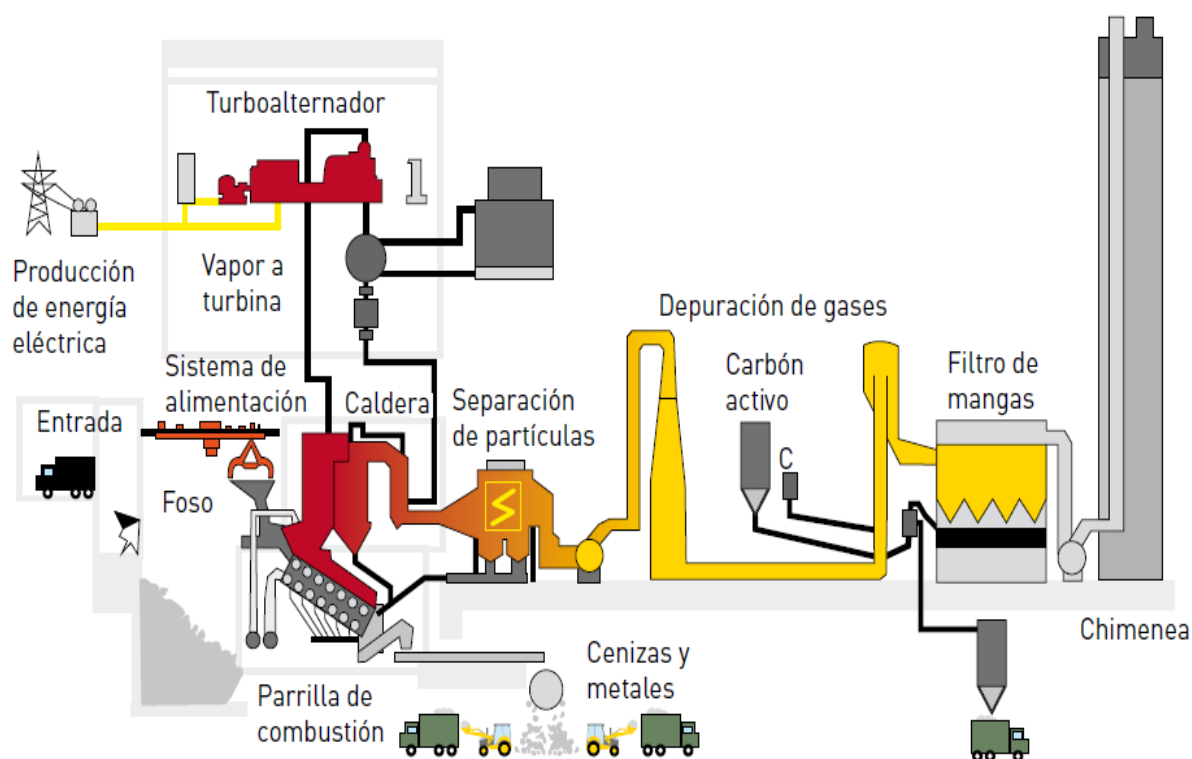
Una parte de la energía química no alcanza a ser convertida o aprovechada, esta se transforma en gases de combustión como son CO₂, H₂O, O₂ y en menor medida en gases ácidos derivados de reacciones de halógenos, azufre, metales volátiles o compuestos orgánicos que no fueron oxidados y material particulado que puede ser arrastrado por la corriente de gas (Armengol, Grau; Farré, Oriol, 2011). Paralelo a esto una parte de los residuos utilizados en la combustión son transformados en escorias inertes y cenizas, se conocen como desechos gaseosos o sólidos que se forman en el proceso de incineración de residuos y deben recibir un tratamiento para minimizar su capacidad contaminante (Armengol, Grau; Farré, Oriol, 2011).

La incineración tiene como objeto principal transformar la energía química en energía térmica, la energía térmica se aprovecha en un horno o caldera para obtener vapor de agua y con este impulsar una turbina de vapor (ciclo Rankine), generando energía mecánica y posteriormente por medio de un generador eléctrico conectado a la turbina se produce electricidad (ver ilustración 3).

La energía generada en el proceso de incineración tiene un rendimiento térmico del orden del 80%. En la tecnología de incineración los tres sistemas más utilizados son:

- ✓ Incineración en horno de parrilla
- ✓ Incineración en horno rotativo
- ✓ Incineración en horno de lecho fluido o fluidizado

Ilustración 3. Incineración en horno de parrilla.



Fuente: (Armengol, Grau; Farré, Oriol, 2011)

Los incineradores presentan una desventaja en términos ambientales, como se mencionó anteriormente liberan contaminantes gaseosos y material particulado a la atmósfera, además sus costos de operación son elevados y generalmente no son aceptados por la comunidad por la posible emisión de dioxinas (Hefa & Yuanan, 2010) (Huang & Dalton, 1975).

El proceso de incineración reduce aproximadamente el 90% del volumen total de los residuos dispuestos en el relleno sanitario, los residuos requieren de pocos pre tratamientos, es un proceso muy estable, permite la incineración completa de los residuos y logra controlar las emisiones que genera por medio de la implementación de tecnologías (Filtros de manga, etc.) (Hefa & Yuanan, 2010). El sistema de incineración está compuesto generalmente por los siguientes elementos:

Tabla 1. Principales Componentes De Una Planta Incineradora

COMPONENTE	TIPO
Unidad de Recepción, pesaje y almacenamiento de los residuos	No Aplica
Unidad de Pre tratamiento o Acondicionamiento de Residuos	1. Trituración 2. Secado
Sistema de alimentación	1. Por gravedad 2. Mecánico 3. Tornillo
Cámara de Combustión	1. Horno Rotatorio 2. Parrillas 3. Lecho Fluidizado
Cámara de Post Combustión	No Aplica
Unidad de Extracción de cenizas y escorias	No Aplica
Unidad de Refrigeración	No Aplica

Fuente: (Gobierno de Chile, 2001)

Una planta incineradora puede consumir el 20% de la energía que produce, se recomienda a los productores de energía a partir de fuentes renovables suministrar la totalidad de energía generada al sistema y abastecerse desde el sistema (Cid Coffré, 2016).

- ✓ Incineración en horno de lecho fluido o fluidizado

El incinerador de lecho fluidizado está compuesto por una cámara de combustión en forma de cilindro vertical, posee una parrilla fluidizada con aire, los residuos ingresan al

reactor por un alimentador rotativo y son sometidos al secado, volatilización, ignición y combustión. (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2011)

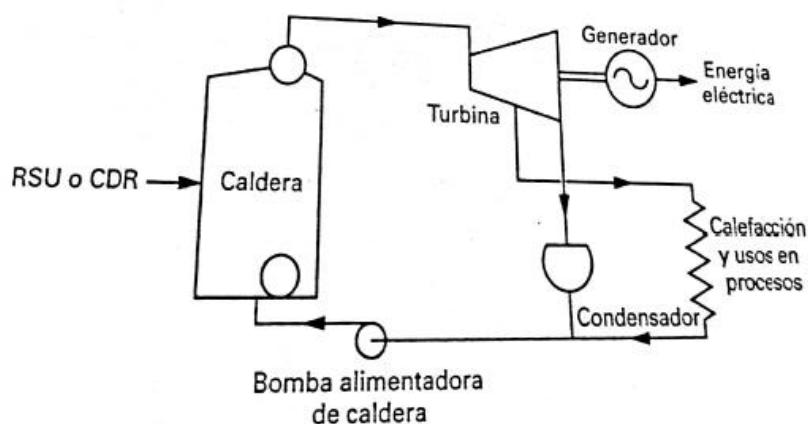
El lecho gira en la cámara de incineración esto provoca mayor resistencia respecto al tiempo, este tipo de incineradores han sido implementados para tratar los residuos urbanos mixtos 10 años atrás (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2011).

El incinerador permite una mezcla homogénea de los residuos, esto conlleva a que en el reactor se distribuya la temperatura y el oxígeno uniformemente, logrando un proceso de combustión estable (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2011).

El proceso de incineración de la tecnología de lecho fluidizado permite la contención de los residuos sin combustionar y los remanentes (cenizas) en el fondo del horno, por lo que se debe retirar el exceso al final del proceso (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2011).

La generación de energía de la planta depende del sistema, debe contar con una caldera alimentada por la incineración de lecho fluidizado rotativo, una turbina de vapor y por último un generador eléctrico para convertir la energía mecánica producida por la turbina en energía eléctrica ver ilustración 4 (Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, Tecnologías de Conversión Térmica, 1998), en algunos casos se habla de turbogeneradores para referirse directamente a la generación de energía eléctrica, estos son impulsados por una turbina de vapor.

Ilustración 4. Flujo de recuperación de energía utilizando turbina de vapor



Fuente: (Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, Tecnologías de Conversión Térmica, 1998)

4.1.2.2 Pirolisis

La pirolisis se usa de dos formas, como un pre tratamiento para las tecnologías de incineración y de gasificación y para obtener productos o servicios (Armengol, Grau; Farré, Oriol, 2011).

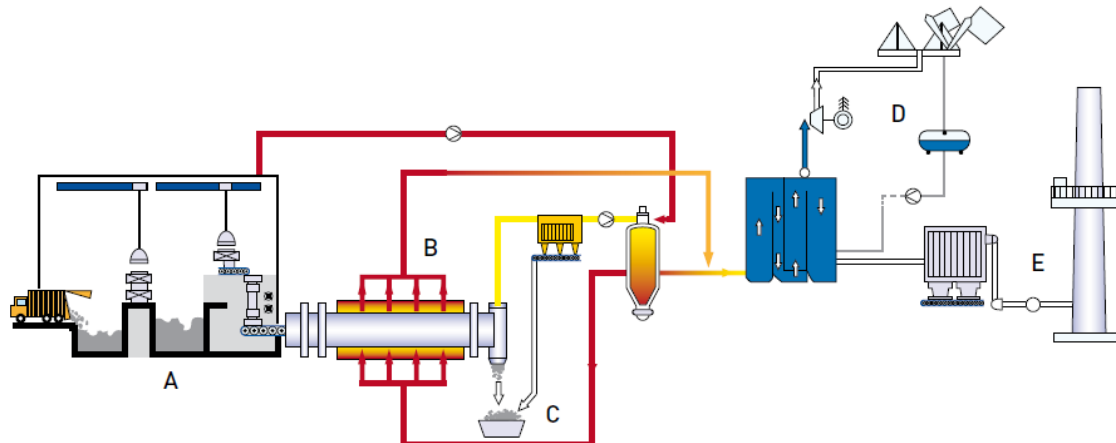
La pirolisis consiste en el calentamiento de la biomasa sin presencia de un agente oxidante, es decir, no se produce una oxidación, este proceso se lleva a cabo a temperaturas que van desde los 300 °C hasta los 600 °C, aunque algunos plantean que la temperatura va desde los 300 °C hasta los 800 °C, en este rango de temperatura la biomasa se descompone produciendo tres productos (sólido, líquido y gas) (Armengol, Grau; Farré, Oriol, 2011).

El producto sólido consta de carbón vegetal que puede utilizarse como combustible, si se produce como biochar⁴ mejora la capacidad productiva del suelo o puede usarse para obtener carbón activado entre otros usos, en cuanto al producto líquido se obtiene acético, cetonas, vapores alquitranados, estos se manifiestan como un gas pero al condensarse forman gotas alquitranadas (Zaman, 2010). La fracción del gas está compuesta por CO, H₂, CO₂, CH₄ e hidrocarburos ligeros (acetileno, etano, etileno) (Zaman, 2010).

En este proceso la obtención de los productos depende considerablemente de las condiciones de operación, el tipo de biomasa (seca) utilizada, tipo de reactor, temperaturas, tiempos y la velocidad de calentamiento, estas características permiten aumentar la producción de uno de los productos disminuyendo los otros dos (Huang & Dalton, 1975). La pirolisis mediante un ciclo de vapor permite la producción de energía eléctrica como se observa en la ilustración 5.

⁴ Palabra inglesa que hace referencia a un producto de grano fino y poroso con apariencia similar al carbón vegetal, se genera por medio de la transformación de diferentes tipos de biomasa mediante la pirolisis (Paco Abenza, 2012).

Ilustración 5. Diagrama de procesos planta de pirolisis.



- A- Zona de descarga y trituración
- B- Pirólisis
- C- Recogida y selección de residuos procedentes del sistema
- D- Recuperación de energía
- E- Depuración de gases

Fuente: (Armengol, Grau; Farré, Oriol, 2011)

La pirolisis resulta ser un proceso que reduce la emisión de metales alcalinos y pesados, evita la corrosión en los equipos, sin embargo, genera óxidos de nitrógeno, compuestos orgánicos volátiles y dioxinas, al igual que otros tipos de tecnologías térmicas empleadas para el proceso de valorización energética de los residuos sólidos (Zaman, 2010)

4.1.2.3 Gasificación

La gasificación es un proceso de combustión donde el agente oxidante puede ser aire, oxígeno, vapor de agua e hidrogeno, se da de manera controlada y se oxida parcialmente la materia a temperaturas que van desde los 600 °C hasta los 1500 °C (Armengol, Grau; Farré, Oriol, 2011).

Esta tecnología busca principalmente la producción de gas, un gas combustible apto para el funcionamiento de turbinas, motores de combustión interna o calderas que puedan generar energía mecánica y posteriormente energía eléctrica (ver ilustración 5) (Armengol, Grau; Farré, Oriol, 2011).

El gas de síntesis se compone esencialmente de CO, H₂, N, CO₂, CH₄, H₂S e hidrocarburos, en la parte sólida se generan cenizas, escorias y carbono no convertido (Belgiorno, De Feo, Della Rocca, & Napoli, 2003). El tipo de reactor seleccionado depende de la composición de la biomasa, la cual debe cumplir con ciertos parámetros

de humedad, contenido de residuos inertes, tamaño de partícula, no pueden ser residuos peligrosos y deben contar con un alto contenido de carbono (Belgiorno, De Feo, Della Rocca, & Napoli, 2003), los tipos de reactores utilizados en esta tecnología son:

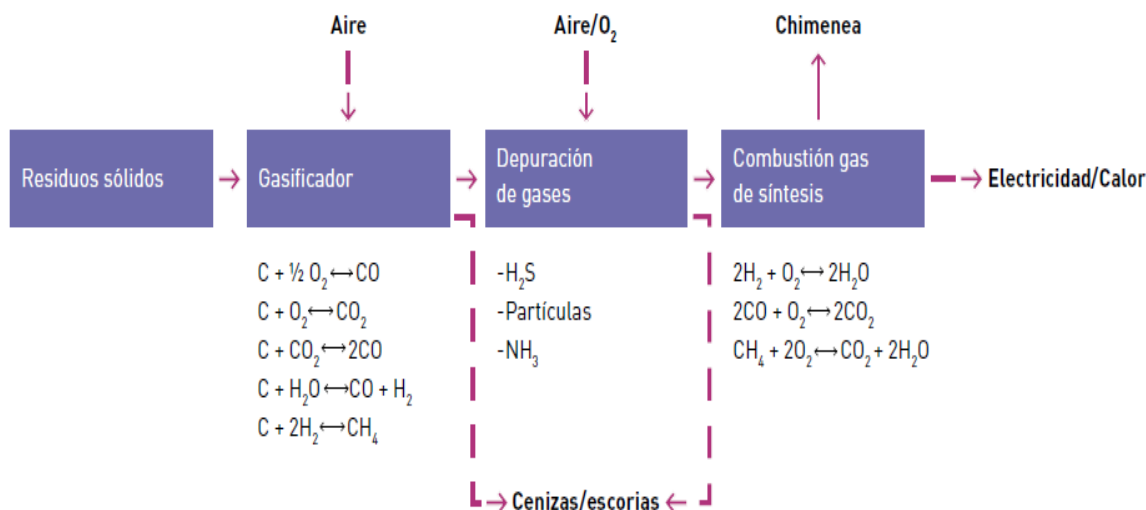
Lecho fluidizado

- ✓ Lecho fluidizado burbujeante
- ✓ Lecho fluidizado circulante
- ✓ Lecho fluidizado de flujo arrastrado

Lecho fijo

- ✓ Lecho fijo a contracorriente
- ✓ Lecho fijo en paralelo
- ✓ Lecho fijo de parrilla

Ilustración 6. Proceso de gasificación.



Fuente: (Armengol, Grau; Farré, Oriol, 2011)

La gasificación permite un incremento en la generación de energía del 50 %, en comparación con los otros sistemas modernos de incineración de residuos sólidos puede competir en términos económicos con la tecnología de incineración convencional (Morris & Waldheim, 1998).

Reduce de manera considerable las emisiones a la atmósfera, la principal desventaja de su implementación es la heterogeneidad de los residuos sólidos, para dicha falencia,

se puede optar por dos opciones, la primera es hacer un combustible derivado de los residuos por medio de un proceso físico y la segunda utilizar únicamente residuos homogéneos, como papel, residuos de comida, del jardín, agrícolas, etc. (Belgiorno, De Feo, Della Rocca, & Napoli, 2003).

Cuando se utilizan los residuos sólidos como un insumo para la generación de energía, calor, etc., por medio de la pirólisis o gasificación se debe realizar un tratamiento previo del insumo, esto evita el mal funcionamiento en los procesos de aprovechamiento térmico (GREENPEACE, 2011). La preparación de los insumos se puede realizar por cualquiera de los procesos descritos a continuación:

Separación:

En los rellenos sanitarios se encuentran residuos mezclados de manera heterogénea, pueden contener metales, vidrios, RCDS⁵, que afectan el proceso o sistema de valorización, por ende se debe efectuar una separación previa, procurando que el insumo o residuo contenga en mayor porcentaje materia orgánica (GREENPEACE, 2011).

Secado:

Los residuos orgánicos contienen un considerable porcentaje de humedad, el cual se debe reducir o eliminar dependiendo del sistema de valorización, en el caso de la pirólisis se elimina el contenido de humedad y en la gasificación se conserva un porcentaje de humedad (GREENPEACE, 2011).

Formación de Bloques:

Por medios mecánicos como una prensa, se consolida en forma de bloques los insumos o residuos, obteniendo un combustible sólido reciclado (CSR), este ingresa al proceso de pirólisis o gasificación (GREENPEACE, 2011).

4.1.3 Estimación de emisiones en un Relleno Sanitario

La disposición final de los residuos sólidos en los (SEDS⁶) es uno de los métodos de eliminación de RSU⁷. El panel intergubernamental sobre cambio climático (IPCC⁸) desarrolló una metodología para estimar las emisiones de gases tales como; dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxidos nitrosos (N₂O), las emisiones de estos gases contribuyen al efecto invernadero del planeta y los SEDS son los principales contribuyentes de gas metano (CH₄) (IPCC, 2006).

⁵ Residuo de demolición y construcción.

⁶ sistemas de eliminación de desechos

⁷ Residuos Sólidos Urbanos

⁸ Intergubernamental Panel on Climate Change

En la gestión de residuos sólidos urbanos, industriales y de otra procedencia se produce gas metano (CH_4), siendo este uno de los gases principales que se genera por el tratamiento y eliminación de los residuos en los SEDS, también se produce en distintas cantidades gases como el dióxido de carbono biogénico (CO_2), compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano (COVDM), óxido nitroso (N_2O), óxidos de nitrógeno (NO_x) y monóxido de carbono (CO). El porcentaje de contribución del metano es del 3% al 4% del total de las emisiones de gases efecto invernadero anuales, por lo que es necesario determinar su producción a través de los inventarios de emisiones con el fin de controlarlo y gestionarlo (IPCC, 2006).

De este modo el IPCC plantea una metodología para lograr estimar las emisiones de metano de los SEDS, este método está basado en la descomposición de primer orden (FOD)⁹, supone que el carbono orgánico degradable que poseen los residuos tiende a descomponerse paulatinamente al trascurrir unas pocas décadas, dentro de las cuales se formará el metano CH_4 y el dióxido de carbono (CO_2), como resultado de esta hipótesis se considera que las emisiones de metano que producen los RSU dispuestos en un relleno son mayores en los años iniciales, pero descienden a medida que el contenido de carbono degradable en los residuos es empleado por bacterias (IPCC, 2006).

Para estimar las emisiones, se debe escoger entre los tres niveles que propone la metodología, cada nivel presenta un grado de complejidad con base a la información, parámetros y datos específicos para estimar el metano, de esta manera los resultados son aceptables.

-Nivel 1: Se efectúa la estimación con información o datos en su mayoría por defecto de la actividad, como mínimo se debe contar con la cantidad de residuos dispuestos en el SEDS (IPCC, 2006)

-Nivel 2: Emplea algunos datos por defecto, pero requiere información específica del lugar o país sobre la eliminación pasada y contemporánea de los residuos en los SEDS (10 años o más) (IPCC, 2006).

-Nivel 3: Utiliza datos específicos del lugar o país, los valores de los parámetros son medidos o determinados por estudios, se debe incluir la vida media, el potencial de generación del metano y el contenido de carbono orgánico de los residuos y la fracción de carbono degradable (IPCC, 2006).

Fracción del carbono orgánico degradable que se descompone (DOC_t)

⁹ First Order Draft

“La fracción del carbono orgánico degradable que se descompone (DOC_f) es una estimación de la fracción de carbono que se degrada en última instancia y que se libera desde un SEDS” (IPCC, 2006).

Factor de corrección para el metano (MCF):

El factor de corrección de CH_4 (MFC) hace referencia a que la cantidad de residuos dispuestos en un SEDS no gestionado generarán menos metano, a diferencia de los SEDS anaerobios gestionados, para los diferentes tipos de SEDS se ha asignado a cada uno un valor de MCF.

4.1.4 Estimación de emisiones de un Sistema de Incineración

La incineración de desechos sólidos municipales (DSM¹⁰) es practicada principalmente en países desarrollados, es un sistema de combustión considerado como una “fuente de emisión de gases de efectos invernadero, los gases pertinentes emitidos incluyen el CO_2 , CH_4 , el metano y el óxido nitroso N_2O ” (IPCC, 2006). Las emisiones de CO_2 resultan ser más significativas que las de N_2O y CH_4 en el proceso de incineración de DSM (IPCC, 2006).

Las directrices del IPPC permiten estimar las emisiones resultantes del proceso de incineración de residuos, proporcionando las variables como; los factores de emisión, datos o valores por defecto de acuerdo a la actividad (IPCC, 2006). El desarrollo de la metodología tiene como inicio la identificación de los residuos a incinerar, las cantidades de residuos e información pertinente de estos, por último se identificó los valores por defecto que se adaptan a las condiciones del país o sistema a implementar, para posteriormente calcular las emisiones de CO_2 , N_2O y CH_4 (IPCC, 2006).

El nivel de complejidad para estimar las emisiones depende en primera instancia en la situación nacional, es decir, si la incineración abierta e incineración es implementada en el país, si es así, se contara con información específica de las plantas que podrá ser recopilada y empleada.

-Nivel 1: Utiliza los valores por defecto propuestos por la metodología y la cantidad de residuos incinerados en base húmeda anuales. (IPCC, 2006)

-Nivel 2: Estima las emisiones con información específica del país respecto a la generación, composición de los residuos, sin embargo, el uso de datos específicos estadísticos reduce la incertidumbre de la información, en dado caso de que los otros datos del sistema de incineración empleados sean datos por defecto (IPCC, 2006)

¹⁰ Desechos Sólidos Municipales

-Nivel 3: Se utiliza información específica sobre el sistema de incineración, como el tipo de instalación o de incinerador (lecho fijo, lecho fluidizado, con cargador mecánico), el tiempo de operación y el contenido de carbono en la ceniza (IPCC, 2006)

Estimación de emisiones de CO₂

Para estimar las emisiones generadas en la incineración abierta o controlada de desechos se debe considerar su contenido de carbono fósil y factor de oxidación, ya que los residuos con origen fósil son susceptibles a generar este tipo de emisiones, por ejemplo el plástico (IPCC, 2006).

Estimación de emisiones de CH₄

La combustión incompleta ocasionada por deficiencias en las variables de temperatura, el tiempo residencia y proporción de aire, son las principales causas de generación de emisiones de CH₄ (IPCC, 2006). Los sistemas de incineración con adecuado funcionamiento, control de la combustión, inyección adecuada de oxígeno pertinente a la cantidad de los residuos suelen tener poca o ninguna participación en las emisiones de este gas (IPCC, 2006)

Estimación de emisiones de N₂O

Las emisiones del óxido nitroso se deben al exceso de la fracción de oxígeno en el proceso de incineración, al tipo de residuos y su contenido de nitrógeno, un factor determinante de estas emisiones es la combustión a bajas temperaturas (IPCC, 2006).

4.2 Marco Conceptual

Disposición Final. Es el método por el cual se almacenan y se aíslan los residuos de cualquier tipo de manera controlada, en lugares debidamente autorizados denominados rellenos sanitarios, con el propósito de prevenir posibles afectaciones a la salud humana y al ambiente. (Area Metropolitana del Valle de Aburrá, 2006)

Emisiones. Es la salida de contaminantes desde fuentes fijas, móviles o naturales a la atmósfera, siendo todas aquellas partículas en suspensión y gases que se liberan a la atmósfera como consecuencia de la combustión de un combustible, evaporación (pinturas, aerosoles, limpiadores), descomposición de materia orgánica, la molienda y la abrasión (erosión de un material), aceleran el efecto invernadero del planeta provocando cambio climático (Master & Wendell, 2008).

Energía. Es la capacidad que poseen los cuerpos para realizar trabajo, producir calor o movimiento. La energía puede manifestarse en forma de energía potencial, esta se almacena y permanece en un cuerpo que no ejerce ningún trabajo, es decir se encuentra en un cuerpo en estado latente (Roldán, 2008). La energía cinética se presenta cuando se efectúa un movimiento, tanto la energía potencial como la cinética pueden clasificarse en energía térmica, mecánica, electroquímica, química, eólica, eléctrica, nuclear, hidráulica y biomasa (Roldán, 2008).

Gases Efecto Invernadero (GEI). Conjunto de compuestos químicos en estado gaseoso de origen natural o antrópico, como el vapor de agua (H_2O), el dióxido de carbono (CO_2), el óxido nitroso (N_2O), el metano (CH_4), el ozono (O_3), los hidrofluorocarbonos (HFC), el hexafluoruro de azufre (SF_6) y los perfluorocarbonos (OFC), se encuentran en la atmósfera y se emiten a esta, absorben la radiación infrarroja emitida por el sol, aumentan y retienen el calor al interior de la tierra, incrementando la temperatura en el planeta (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

Proceso termoquímico. Conjunto de reacciones químicas irreversibles a altas temperaturas y condiciones variables de oxidación, implica un cambio en la estructura y composición química del material o componente que se someta al proceso. Los procesos termoquímicos aprovechan la biomasa del planeta para obtener combustibles en estado sólido, líquido o gaseoso por medio de las tecnologías de incineración, gasificación, pirolisis, etc. (Gómez, Klose, Rincón, & Wiest, 2004).

Producción. Cantidad de residuos generados diariamente por un habitante de un lugar o región determinada, la cantidad producida se mide en kilogramos por habitante al día. La producción también hace referencia a la cantidad de residuos procedentes de una ciudad y dispuestos en un relleno sanitario u otro método de disposición final (Contreras, 2006).

Recolección. Toda actividad o proceso que lleva a cabo la empresa de aseo, con el fin de recoger y transportar los residuos dispuestos por los usuarios del servicio de aseo, para el respectivo aprovechamiento, tratamiento o disposición final (Congreso de la Republica de Colombia, 2013).

Recuperación. Consiste en la selección y reincorporación de residuos aprovechables en un ciclo productivo. Los residuos reincorporados se convierten en materia prima, esta se emplea para elaborar otro tipo de productos. La recuperación se efectúa por medio de procesos térmicos, químicos o mecánicos (Congreso de la Republica de Colombia, 2002).

Relleno Sanitario. Espacio destinado para disponer los residuos sólidos que produce una ciudad, se construye y diseña bajo especificaciones técnicas y principios ingenieriles que permiten el control y tratamiento de los productos que este genera (lixiviados, gases, vectores y malos olores), evita la afectación a la población y al medio ambiente (Robayo , 2012).

El relleno sanitario es el último escalón en la gestión de los residuos, es el lugar donde se confinan y aíslan para degradarse, consiste en almacenar el mayor volumen de desechos posible en un área pequeña, se compactan y cubren diariamente con una capa de pasto que ha sido podado o un geotextil (Robayo , 2012).

Residuo Sólido. Son todos aquellos residuos que se encuentran en estado sólido, se excluyen líquidos y gases, estos residuos resultan del consumo y/o uso de un bien el cual es desechado por su dueño. Se clasifican en función de la actividad de la cual provienen ya sea actividad agropecuaria, forestal, minera o urbana. A excepción de los residuos que se producen en la actividad minera todos los residuos de las actividades restantes son susceptibles de aprovechamiento (Master & Wendell, 2008) (Congreso de la Republica de Colombia, 2013).

Residuo Sólido Urbano (RSU). Son todos los residuos sólidos que tienen una fuente de generación específica, se denominan RSU a aquellos que provienen de las actividades desarrolladas al interior de una urbe como; las Industrias, Instituciones, Comercios y residencias, siendo residuos que pueden ser aprovechados de distintas maneras (Master & Wendell, 2008) .Los RSU son aquellos que pueden disponerse en un relleno municipal o bien pueden ser incinerados (Master & Wendell, 2008).

Residuos de Jardinería y Poda. Son los desechos que resultan del mantenimiento a parques, jardines, senderos ecológicos, calles, avenidas, es decir de todo espacio donde los árboles, arbustos y pastos se han empleado para mantener las áreas urbanizadas más naturales. El mantenimiento consiste en el retiro constante de ramas, hojas, trozas y pastos que puedan causar daños a los bienes y servicios públicos y privados (Ambientum, 2003). Los residuos o desechos de jardinería y poda

correspondientes a ramas, hojas, trozas y pastos se caracterizan por ocupar grandes volúmenes pero son de un peso relativamente bajo (Congreso de la Republica de Colombia, 2013).

Residuos de Madera. Aquellos restos o remanentes de las fases en la cadena productiva forestal, mayoritariamente son desechos provenientes de la industria de los muebles, como el aserrín, las virutas, los restos de las chapas, tableros y los recortes de madera, también los desechos compuestos mayoritariamente de madera como mesas, sillas, armarios, etc., productos de ebanistería que han dejado de ser útiles (Canastero Ríos, 2014).

Residuos de Papel Y Cartón. Como su nombre lo indica son todos aquellos residuos de papel y cartón como revistas, periódicos, libros, materiales de embalaje, papel de oficina, cajas, cartón corrugado, etc., los grandes generadores son las instituciones y lugares comerciales, le siguen las industrias y las residencias. Aproximadamente el 60% del papel y del cartón se vuelve a recuperar para ser reciclado, mientras que el porcentaje restante es dispuesto en un relleno sanitario (Ramírez , 2014).

Residuos de Alimentos. Se clasifican como residuos ordinarios, son las sobras de la alimentación humana, su fuente de generación son residencias, comercios e instituciones. Estos desperdicios pueden ser de origen vegetal o animal (frutas, verduras, todo tipo de cascara, carne, etc.), se encuentran cocidos, pre-cocidos o procesados, presentan un grado de descomposición bastante alto, en presencia o ausencia de oxígeno se transforman en otro tipo de sustancia. Al llegar a un relleno sanitario su rápida descomposición produce biogás. (Consejo de Bogotá D.C, 2013) (Universidad Industrial de Santander, 2009).

Vectores. Se denomina vector a todo organismo que actúa como elemento transmisor de un agente patógeno entre el medio ambiente y el hombre o de un organismo a otro. Son vectores las ratas, ratones, cucarachas, mosquitos, moscas, etc. La transmisión de enfermedades puede darse de manera directa o indirecta, la primera se presenta al consumir alimentos y agua contaminados por vectores, la segunda forma es la transmisión de enfermedades por medio de las picaduras o mordeduras (SaludMadrid, 2016).

4.3 Marco Legal

En Colombia la política referente a los residuos sólidos tiene su cimiento en la constitución política de Colombia de 1991, establece en el artículo 49 la obligación del estado frente a la prestación del servicio público de aseo o saneamiento ambiental. Instaura en el artículo 79 del título II, capítulo 3, el derecho colectivo de gozar de un ambiente sano y por ende atribuye como deber del estado protegerlo, en el artículo 365, capítulo V, define que *“los servicios públicos son inherentes a la finalidad social del Estado”* (Aristizabal & SÁCHICA, 2001), este debe cerciorar que la prestación del servicio sea eficiente y oportuna para todos los habitantes del territorio nacional. El artículo 366 constituye que el estado tiene como finalidad social el bienestar y calidad de vida de todos los colombianos, por medio de los consejos municipales se debe normalizar las funciones y regular la eficiencia de los servicios públicos, conforme a lo estipulado en el artículo 313 (Aristizabal & SÁCHICA, 2001).

La constitución de Colombia contempla la prestación del servicio público domiciliario de aseo como responsabilidad del Presidente de la República de acuerdo al artículo 370, de igual forma la superintendencia de servicios públicos domiciliarios será el ente de control, vigilancia e inspección del servicio público de aseo (Aristizabal & SÁCHICA, 2001).

La ley 99 de 1993 establece la creación del ministerio de medio ambiente, dando paso a la organización del SINA, constituido por las entidades gestoras de la conservación de los recursos naturales y el medio ambiente, está ley enmarca en el artículo 1 la protección y recuperación del ambiente como un esfuerzo que vincula la participación tanto del estado, la comunidad, organizaciones no gubernamentales y entidades del sector privado. En su artículo 45 parágrafo 2, construye conceptos relacionados con el saneamiento básico, respecto a residuos sólidos especifica ejecutar obras para el manejo y disposición de estos (Aristizabal & SÁCHICA, 2001).

Está ley enmarca la implementación de nuevas tecnologías limpias, la reutilización de los residuos y el reciclaje como acciones que deben ser perpetradas por el ministerio de medio ambiente, otorga competencia a las corporaciones autónomas regionales, municipios y al Distrito Capital de Bogotá ante estrategias, proyectos, programas orientados a la *“disposición, eliminación y reciclaje de residuos líquidos y sólidos y del control a las emisiones contaminantes del aire”*, en los artículos 5, 31 y 65 respectivamente (Aristizabal & SÁCHICA, 2001).

En 1994 se dio paso para normativizar la regulación de los servicios públicos domiciliarios, por medio de la Ley 142, en donde se incluye el servicio público de aseo, definido en el artículo 14 como *“el servicio de recolección municipal de residuos, principalmente sólidos. También se aplicará esta ley a las actividades complementarias*

de transporte, tratamiento, aprovechamiento y disposición final de tales residuos” (Aristizabal & Sáchica, 2001).

El decreto 1713 de 2002 derogado por el artículo 120 del decreto nacional 2981 de 2013, pauta el servicio público de aseo en base a la gestión integral de los residuos sólidos, garantiza la calidad del servicio, eficiencia y eficacia continua, en busca de la cultura de la no basura, el aprovechamiento, minimización y mitigación de impactos en la salud y el medio ambiente.

La resolución 754 de 2014 tiene por objeto las pautas de *“la formulación, implementación, evaluación, seguimiento, control y actualización de los planes de gestión de residuos sólidos”*. Resolución 1529 de 2010 por la cual se establecen las consideraciones y requisitos al efectuar el cierre y clausura de los rellenos sanitarios a través de un plan de manejo ambiental.

A nivel legislativo el Congreso instauró la Ley 1715 de 2014, la cual tiene como objeto *“la promoción y utilización de fuentes no convencionales de energía, haciendo hincapié en las de carácter renovable”* (Congreso de la República de , 2014). En el artículo 18 de esta ley, se contempla la energía a partir de los residuos sólidos como una fuente no convencional de energía, establece que *“el contenido energético (fracción biodegradable y fracción combustible) de los residuos sólidos que no sean susceptibles de reutilización y reciclaje”*, pueden ser utilizados para la generación de energía bajo los criterios técnicos que defina el ministerio de minas y energía.

La Ley 1715 de 2014 reconoce el “residuo” que la sociedad convencionalmente denomina “basura”, como un producto que posee características que permiten incorporarlo nuevamente a un ciclo productivo para generar un bien o servicio, es decir, que aunque no todos los residuos se pueden reciclar o reutilizar, son susceptibles a la valoración con fines de recuperación energética (Cedano de León, 2013).

Este marco legislativo no sólo da paso a la valorización energética de los residuos sólidos, también establece el aprovechamiento de estos, en este caso el aprovechamiento energético está en el marco de la política de gestión integral de residuos sólidos, esto indica que dicha alternativa es legal y puede ser empleada en el territorio Colombiano, siempre y cuando su actividad esté sujeta al marco normativo y a los criterios dictados por el ministerio de minas y energía.

4.4 Marco Histórico

“La aplicación del método de relleno sanitario se atribuye a los ingenieros J.C Dawes y M. Call, se utilizó por primera vez en Bradford, Inglaterra en la década de 1920 e inspiró a los demás a construir rellenos sanitarios” (Benavides & Soto , 2015).

Desde 1900 existió la problemática de los residuos sólidos, para estas fechas Bogotá operaba el sistema de aseo por medio de la institución Sociedad de Aseo y Ornato, se creía que toda la problemática de los residuos era culpa de la empresa operadora, en 1904 la administración municipal decidió asumir la dirección de la operación del sistema, sin embargo, no se obtuvo solución ni se observó mejoras, para mayo de 1922 se inició la disposición de los desechos en un botadero ubicado en el actual barrio Quiroga, se aconsejó *“quemarlos con petróleo, cosa que daba magníficos resultados, pues se disminuían las moscas y los malos olores”* (Collazos, 1998).

Ante la continua crisis se planteó como solución en 1956 la creación de la Empresa Distrital de Servicios Públicos (EDIS), las acciones y estudios que realizó la Caja Agraria (Collazos, 1998) permitió que en 1971 el instituto de investigaciones tecnológicas, propusiera soluciones para la disposición final a través de un estudio presentado a la EDIS, en el estudio se mencionó lo siguiente : *“fabricar abono orgánico, incinerar con recuperación de calor, diseñar un relleno sanitario, fabricar bloques para obras civiles, recuperar parte de ellas, combinar varios de los métodos anteriores”* (Collazos, 1998). De las alternativas propuestas la más viable resultó ser la construcción del relleno sanitario, dado a que la producción de residuos para esa época era de 1.236 ton/ día. En 1980 hubieron dos botaderos principales y 30 de menor área disgregados en la ciudad, los dos botaderos principales eran el Cortijo y Gibraltar (Collazos, 1998).

La gran problemática de los rellenos terminó convirtiéndolos en botaderos, la elevada producción y acumulación de residuos hizo necesario el diseño de un relleno sanitario funcional y operativo. La Corporación Autónoma de Cundinamarca en 1984 contrató el consorcio Colombo-Americano INGESA-URS para realizar el respectivo diseño del relleno sanitario (Makyu, 1998). El primer diseño del Relleno Sanitario Doña Juana estuvo listo en marzo de 1896 y se presentó a la empresa distrital de servicios públicos de esa época (Makyu, 1998).

En 1988 la crisis sanitaria por la acumulación de residuos en la ciudad incentivo el desarrollo de un programa de operación para la construcción del relleno pero las condiciones previstas se cambiaron por problemas con la adquisición de los terrenos por parte de la CAR, ya que los terrenos eran susceptibles a ser urbanizados (Makyu, 1998).

La oportuna gestión de la EDIS permitió adquirir los predios necesarios para llevar a cabo la construcción del relleno sanitario, para 1989 el relleno sanitario inició su operación, en 1992 se llevó a cabo la segunda etapa del relleno, fue diseñada por la empresa Hidromecánicas Ltda. (Makyu, 1998).

Hidromecánica Ltda resultó ganador del concurso de méritos que realizó la EDIS para la construcción de la segunda etapa, lo propuesto por Hidromecánicas no se llevó a término por factores económicos. En 1994 se decidió implementar un diseño más económico presentado por Prosantana Ltda. , empresa que obtuvo la licitación pública para manejar y administrar el relleno (Makyu, 1998).

El relleno sanitaria doña Juana se inauguró el 1 de noviembre de 1988, se proyectó su funcionamiento por 20 años, aunque a escasos 10 años de funcionamiento presentó fallas de operación, esto representó una problemática para la población circundante y para los componentes ambientales, dentro de las problemáticas asociadas al relleno desde que fue instaurado están; los derrumbes a causa de los movimientos en masa, causados por la acumulación de residuos y las explosiones por la acumulación de gases (Makyu, 1998). Los derrumbes acontecidos en el relleno sanitario Doña Juana son el del 28 de septiembre de 1997, 27 de septiembre de 2007, 5 de agosto de 2009, 2 de octubre de 2015. Aunque el relleno tiene licencia para operar hasta el año 2022, es posible que se pueda aumentar su vida útil hasta el 2030 (Bogotá, 2015) (Lopez & Virviescas, 2009) (El Tiempo, 2015) (NULLVALUE, 1997).

Las emisiones totales de GEI en Gg de CO₂ eq¹¹ para Colombia son: 165.041 Gg en 1990, 176.077 Gg para el año 1994, 183.044 Gg¹² en el 2000, 199.209 Gg para el 2004, 223.949 Gg en 2010 y 178.258 Gg para el 2012 (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & CANCELLERÍA, 2015). Las emisiones de GEI a causa de los residuos sólidos para Colombia en 1990 correspondieron al 4,4% (7.317 Gg), para el año de 1994 los residuos emitieron el 5,1% (8.907 Gg) del total de las emisiones, en el 2000 los residuos contribuyeron con un 5,8% (10.578 Gg) de las emisiones totales, en el año 2004 se mantuvo con un 5,8% (11.654 Gg), para el año 2010 fueron del 6% (13.706 Gg) y la participación del año 2012 fue del 8% (14.297 Gg) (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & CANCELLERÍA, 2015). Evidentemente la contribución de emisiones ha incrementado con los años, el aumento de población y generación de residuos sólidos urbanos son los principales factores que inciden en este comportamiento.

¹¹ CO₂ equivalente es el valor de referencia utilizado para medir la posibilidad de calentamiento global de cada uno de los GEI.

¹² Gg= Gigagramos

5. Metodología

La investigación del proyecto, corresponde a una investigación correlacional porque se determinó una serie de variables como la tecnología, cantidad y características de los residuos, evaluando la relación de las mismas con el potencial de generación de energía; se estimó la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero del sistema de valorización respecto al relleno, sumado a esto se analizó la viabilidad de un sistema de valorización energética y se calculó la producción de energía eléctrica.

El proyecto se desarrolló teniendo en cuenta que cada objetivo contó con una serie de actividades, que a su vez empleaban instrumentos o herramientas metodológicas asociadas. A continuación se resumen estas variables, que son ampliadas más adelante.

Tabla 2. Diseño Metodológico

OBJETIVO ESPECÍFICO	ACTIVIDADES	HERRAMIENTA METODOLÓGICA
Identificar las características físicas de los residuos sólidos dispuestos en el Relleno Sanitario Doña Juana por medio de información secundaria, con el fin de evaluar su potencial valorización energética.	Recolección de la información pertinente.	-Revisión de los informes de la Superintendencia de servicios públicos, UAESP ¹³ , libros y artículos.
	Identificación del tipo de residuos sólidos dispuestos en el RSDJ.	-Tabulación de la información correspondiente. -Cálculo del peso de cada residuo de acuerdo a la composición porcentual. -Estimación de tendencias de los residuos.
	Características físicas y térmicas de los residuos sólidos (poder calorífico, porcentaje de humedad)	-Recopilación y depuración de la información secundaria. -Tabulación de la información. -Identificar bibliográficamente el porcentaje de humedad de cada residuo susceptible a

¹³ Unidad Administrativa Especial De Servicios Públicos

OBJETIVO ESPECÍFICO	ACTIVIDADES	HERRAMIENTA METODOLÓGICA
		<p>aprovechamiento.</p> <p>-Cálculo del peso de los residuos en base seca.</p> <p>-Estimación del poder calorífico inferior mediante fuentes secundarias.</p> <p>-Estimación del potencial de generación de energía.</p>
<p>Identificar y describir los sistemas de valorización o tecnología existentes, especificando las características, eficiencias y costos que permitan establecer un criterio de priorización de dicho sistema de acuerdo a las condiciones del Relleno Sanitario Doña Juana.</p>	<p>Recolección de la información.</p>	<p>-Revisión de artículos científicos, documentos, libros, informes pertinentes.</p>
	<p>Identificar las características o condiciones de las tecnologías asociadas a la valorización energética.</p>	<p>-Con base en la información secundaria identificar las condiciones operativas, económicas y ambientales de los sistemas de aprovechamiento</p> <p>-Establecer las pautas de evaluación para cada condición operativa, económica y ambiental.</p> <p>-Evaluar las condiciones operativas, económicas y ambientales para los tres sistemas de valorización propuestos.</p>
	<p>Priorización de las tecnologías.</p>	<p>-Elaboración de una matriz cruzada con el fin de evaluar y comparar las tecnologías acorde a criterios del autor.</p> <p>-Ponderación de los resultados</p>

OBJETIVO ESPECÍFICO	ACTIVIDADES	HERRAMIENTA METODOLÓGICA
		mediante una evaluación cuali-cuantitativa multicriterio.
<p>Calcular el potencial de generación de energía eléctrica con base en el potencial de energía de los residuos y las características de la tecnología seleccionada, a través de métodos matemáticos que determinen la viabilidad de la alternativa propuesta.</p>	<p>Caracterizar condiciones del sistema elegido.</p> <p>Calcular la cantidad de energía producida del sistema de valorización que se adapta a las condiciones del relleno sanitario Doña Juana.</p> <p>Estimar contribución en el sistema energético nacional y local.</p>	<p>-Descripción de sistema, funcionamiento y capacidad de tratamiento de acuerdo a los residuos dispuestos en el año 2015.</p> <p>-Determinar la eficiencia del sistema de valorización energética priorizado.</p> <p>-Desarrollar las gráficas y análisis de los escenarios planteados.</p> <p>-Estimación de energía eléctrica a partir de los residuos susceptibles a aprovechamiento térmico.</p> <p>-Revisión bibliográfica de producción de energía eléctrica en los sistemas de información nacional SIEL¹⁴</p> <p>-Tabulación y análisis de la contribución al sistema energético nacional y local.</p>

¹⁴ Sistema de información Eléctrico Colombiano

OBJETIVO ESPECÍFICO	ACTIVIDADES	HERRAMIENTA METODOLÓGICA
<p>Calcular la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero de las condiciones actuales de disposición de los residuos en el relleno sanitario Doña Juana con respecto a las del sistema de valorización energética propuesto.</p>	<p>Revisión de metodología y de factores de emisión</p> <p>Cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero.</p> <p>Cálculo de la reducción de emisiones de GEI</p>	<p>Revisión bibliográfica de metodologías y factores de emisión aplicables al contexto</p> <p>Cálculo matemático de acuerdo a directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, Volumen 5, Desechos.</p> <p>3. Cálculo del Factor de emisión de SIN¹⁵ por la generación de energía, resolución 843 de 2016.</p> <p>-Estimación de la reducción de emisiones por métodos matemáticos.</p>

Fuente: Elaborado por los Autores (2017)

5.1 Identificar el tipo de residuos sólidos dispuestos en el RSDJ

Teniendo en cuenta las características del RSDJ, la cantidad de residuos dispuestos en el mismo y la dificultad en el acceso a sus instalaciones; no es factible la realización de cuarteos o la aplicación directa de otras metodologías para la caracterización física de los residuos. Además, en las solicitudes realizadas al relleno sanitario en la fase inicial de exploración del proyecto, no se permitió siquiera la realización de una visita, ni el acceso a la información que permitiera iniciar el proceso de investigación.

El análisis de los residuos debía ser efectuado bajo los parámetros y condiciones adecuadas por lo que se requería de un laboratorio con los equipos necesarios para identificar las propiedades físicas y químicas, adicional a esto asegurar los estándares de calibración de los equipos, las condiciones óptimas para transportar la muestra del RSDJ al laboratorio y la preservación de la misma. En el muestreo se debe asegurar la

¹⁵ Sistema Interconectado Nacional

toma de la parte superior, media e inferior de los montículos donde se depositan los residuos de acuerdo con la bibliografía consultada (Castro de Esparza , 1995), dado a las condiciones actuales del relleno y los eventos de deslizamiento muestran un umbral alto de riesgo.

Por lo anterior, la información secundaria utilizada para identificar el tipo y la cantidad de residuos que se disponen en el relleno sanitario de Doña Juana fue facilitada por la UAESP en respuesta al derecho de petición interpuesto como último mecanismo para el desarrollo de esta fase del proyecto. La información entregada por este mecanismo, incluye la composición porcentual mensual de los residuos y la cantidad dispuesta (ton/mes) para el año 2015 y primer semestre del año 2016 (VER ANEXO 1 Y 2).

Los residuos dispuestos en el RSDJ de acuerdo a la información secundaria son el cartón, caucho, cenizas, cerámica, cuero, hueso, ladrillo, madera, materia orgánica, metales, minerales, papel, plástico, textil y vidrio.

5.1.1 Características Físicas y térmicas de los residuos

5.1.1.1 Peso

El peso de los residuos dispuestos en el relleno sanitario Doña Juana, se halló a partir de la composición porcentual de cada residuo respecto a la cantidad total anual de los residuos.

La ecuación se planteó para determinar el peso de cada residuo (ton/mes) para el año 2015 y primer semestre del año 2016. Se utilizó el peso total (peso de todos los residuos) de cada mes como el 100% de la muestra, se calculó el peso de cada residuo de acuerdo a su contenido (%) en el peso total (información entregada por la UAESP, como se mencionó anteriormente).

Ecuación 1. Cálculo de la cantidad de residuo producida (CRP)

$$CRP = CRD \times \%cr$$

Donde:

CRP = Cantidad de cada tipo de residuo producida en toneladas por mes

CRD= Cantidad total de residuos dispuesta en el relleno sanitario en toneladas por mes

%cr = Porcentaje de cada tipo de residuo, obtenida de cuarteos realizados y documentados por la UAESP a los residuos totales dispuestos en el relleno sanitario

5.1.1.2 Contenido de Humedad

Según la bibliografía consultada, el contenido de humedad dado en porcentaje se determina “*para varios tipos de residuos tal como son encontrados en los contenedores, compactados o no compactados*” (Tchobanoglous, Gestión Integral de Residuos Sólidos Volumen I, 1994).

Néstor Gooding “*plantea que si la composición de un material incluye el agua se dice que está en base húmeda, cuando la composición excluye el agua está en base seca*”, generalmente en el secado de sólidos se expresa el contenido de humedad por “*unidad de peso sólido seco o peso del sólido húmedo*”, se representa en porcentaje multiplicando por 100% (Gooding Garavito, 2009).

Ya que los residuos dispuestos en el relleno sanitario poseen la condición propuesta por Tchobanoglous, se determinó el contenido de humedad con los factores por defecto o típicos propuestos para cada residuo (ver tabla 3).

Según el mismo autor “*la masa del residuo sólido en base húmeda posee cierto % de humedad, este se estima con la diferencia del residuo en base humedad menos la base seca, dividido en el peso en base húmeda y multiplicado por 100%*” (Tchobanoglous, Gestión Integral de Residuos Sólidos Volumen I, 1994). Al no conocer el peso seco del residuo se estimó el contenido de la humedad de la siguiente forma:

Se tomó el peso de los residuos como el 100% de la muestra, de acuerdo al porcentaje o contenido de humedad de cada residuo se obtuvo el peso del agua contenida o fracción de agua en el residuo. El contenido de agua varía de acuerdo al porcentaje de humedad de cada residuo (Véase anexo Excel 1)

Ecuación 2. Peso de la fracción de agua contenida en cada tipo de residuo (PACR).

$$PACR = CRP \times PHT$$

Donde:

PACR: Peso de la fracción de agua contenida en cada tipo de residuo en toneladas por mes

CRP: Cantidad de cada tipo de residuo producida en toneladas por mes

PHT: Porcentaje de Humedad típico para cada residuo propuesto por Tchobanoglous

Tabla 3. Contenido De Humedad De los Residuos

<i>Componente</i>	<i>Porcentaje en peso</i>	<i>Contenido en humedad, porcentaje</i>
-------------------	---------------------------	---

<i>Componente</i>	<i>Porcentaje en peso</i>	<i>Contenido en humedad, porcentaje</i>
<i>Orgánicos</i>		
<i>Residuos de comida</i>	9,0	70
<i>Papel</i>	34,0	6
<i>Cartón</i>	6,0	5
<i>Plástico</i>	7,0	2
<i>Textiles</i>	2,0	10
<i>Goma</i>	0,5	2
<i>Cuero</i>	0,5	10
<i>Residuos de jardín</i>	18,5	60
<i>Madera</i>	2,0	20
<i>Orgánicos misceláneos</i>	-	-
<i>Inorgánicos</i>		
<i>Vidrio</i>	8,0	2
<i>Latas de hojalata</i>	6,0	3
<i>Aluminio</i>	0,5	2
<i>Otros metales</i>	3,0	3
<i>Suciedad, cenizas, etc.</i>	3,0	8
<i>Total</i>	100,0	

Fuente: (Tchobanoglous, Gestión Integral de Residuos Sólidos Volumen I, 1994)

15.1.1.3 Peso residuo en base seca

El peso expresado en base seca se considera como el combustible secado en el proceso de recuperación de energía o por un pre tratamiento (FAO, 2004). Se calculó la base seca de los residuos sólidos utilizando la siguiente ecuación:

Ecuación 3. Peso base Seca Residuos Sólidos (PBRs).

$$PBRs = CRP - PACR$$

Dónde:

PBRs: Peso base seca residuos Sólidos en toneladas por mes

CRP: Cantidad de cada tipo de residuo producida en toneladas por mes

PACR: Peso de la fracción de agua contenida en cada tipo de Residuo en toneladas por mes

5.1.1.4. Contenido energético de los residuos

Para identificar la variable del poder calorífico de los residuos también se recurrió a información secundaria, que en este caso es obtenida de forma experimental y cuyos resultados “*están basados en los resultados obtenidos en los ensayos con una bomba calorímetro*” (Tchobanoglous, Gestión Integral de Residuos Sólidos Volumen I, 1994).

Para determinar el poder calorífico de los residuos dispuestos en el RSDJ, y con el ánimo de ser conservadores en cuanto a la cantidad de energía que podía ser obtenida de los residuos, se escogió el valor inferior del rango estipulado por Tchobanoglous. Los residuos como la cerámica, hueso, ladrillo, minerales, no se consideraron ya que no se identificó su poder calorífico en la tabla de contenido energético que propone Tchobanoglous.

Tabla 4. Contenido energético de los RSU

Componentes	Rechazos inertes, porcentaje		Energía, Kcal/Kg	
	Rango	Típico	Rango	Típico
Orgánicos				
Residuos de comida	2-8	5,0	833-1.667	1.111
Papel	4-8	6,0	2.778-4.444	4.000
Cartón	3-6	5,0	3.333-4.167	3.889
Plásticos	6-20	10,0	6.667-8.889	7.778
Textiles	2-4	2,5	3.611-4.444	4.167
Goma	8-20	10,0	5.000-6.667	5.556

Cuero	8-20	10,0	3.611-4.722	4.167
Residuos de jardín	2-6	4,5	556-4.444	1.556
Madera	0,6-2	1,5	4.167-4.722	4.444
Orgánicos misceláneos	-	-	-	-
Inorgánicos				
Vidrio	99-99+	98,0	28-56	33
Latas de hojalata	96-99+	98,0	56-278	167
Aluminio	90-99+	96,0	-	-
Otros metales	94-99+	98,0	56-278	167
Suciedad, cenizas, etc.	60-80	70	556-2.778	1.667
Residuos sólidos urbanos			2.222-3.333	2.778

Fuente: (Tchobanoglous, Gestión Integral de Residuos Sólidos Volumen I, 1994)

La energía potencial de los residuos sólidos dispuestos en el RSDJ se determinó con el peso de los residuos sólidos en kilogramos, para posteriormente multiplicar por el poder calorífico, por lo que se reemplazó en la siguiente ecuación:

Ecuación 4. Contenido energético cada tipo de residuo en base seca (CEBSR)

$$CEBSR = CRP \times \frac{PCI}{1000}$$

Donde:

CEBSR: Contenido energético de cada tipo de residuo en base seca, en kcal/mes

CRP: Cantidad de cada tipo de residuo producida en toneladas por mes

PCI: Poder calorífico inferior (límite inferior) para cada tipo de residuo propuesto por Tchobanoglous en kilocalorías por kilogramo

Paralelo a esto, como mecanismo de comprobación de los resultados, se utilizó la ecuación propuesta de Tchobanoglous para determinar el contenido energético de los residuos en base seca, con el fin de cerciorarse por dos métodos matemáticos el peso en base seca de los residuos y su potencial de generar energía:

Ecuación 5. Contenido energético en base seca de los residuos sólidos (CEBSR).

$$CEBSR = Rd \times \left(\frac{100}{100 - PHT} \right)$$

Fuente: (Tchobanoglous, Gestión Integral de Residuos Sólidos Volumen I, 1994)

Donde:

Rd: Residuos desechados en unidades de Kcal por kilogramo

PHT: Es el porcentaje de Humedad típico para cada residuo propuesto por Tchobanoglous

El contenido energético en base seca de los residuos sólidos se convirtió a unidades de kilovatios-hora al reemplazar en la siguiente ecuación:

Ecuación 6. Potencial Energético de los Residuos (PERS)

$$PERS = CEBSR \times FC$$

Donde:

PERS: Potencial energético de los residuos en kilovatios-hora por mes

CEBSR: Contenido energético de cada tipo de residuo en base seca, en kcal/mes

FC: Es el factor de conversión requerido para pasar de medidas de kilocalorías a kilovatios-hora

El factor de conversión se determinó a partir de la siguiente equivalencia:

Ecuación 7. Equivalencia de energía y calor

$$1 \text{ kcal} = 1.000 \text{ cal}$$

$$1 \text{ cal} = 0,00000116 \text{ kWh}$$

$$1 \text{ kcal} = 0,00116 \text{ kWh}$$

5.2 Evaluación De Las Tecnologías De Conversión Térmica

La incineración, pirolisis y gasificación buscan la recuperación del contenido energético de los RSU, a través de un sistema de recuperación de energía, por lo cual se determinó el análisis y evaluación de las características de estas tres tecnologías por medio de una matriz cruzada, se estableció que sistema se adapta mejor a las

condiciones del relleno sanitario Doña Juana (Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, Tecnologías de Conversión Térmica, 1998).

Las características o criterios seleccionados para el respectivo análisis y posterior evaluación fueron tomados con base en la información recopilada de artículos científicos, documentos, informes, libros, etc.

La implementación de las tecnologías para el aprovechamiento de los residuos sólidos urbanos depende fundamentalmente del tipo de biomasa a aprovechar, la disponibilidad del recurso (RSU) como combustible para la producción de energía, los costos, eficiencia y la vida útil.

Las variables mencionadas anteriormente son importantes al momento de seleccionar la tecnología y por lo tanto el proceso térmico que permite la valorización de los residuos, por lo cual, se especificaron los siguientes criterios o parámetros para evaluar:

1. Residuo susceptible de aprovechamiento térmico
2. Pre tratamiento
3. Productos
4. Temperatura de operación
5. Capacidad de tratamiento (Tonelada/día)
6. Eficiencia
7. Vida útil
8. Costos de implementación
9. Porcentaje de reducción de volumen del residuo
10. Emisiones de Gases y partículas

Matriz cruzada

Con el propósito de establecer la tecnología más viable se diseñó una matriz cruzada, que permitió evaluar y comparar las tecnologías acorde a los criterios definidos por los autores con base a la información recopilada.

Este método permitió seleccionar la tecnología más adecuada a partir del análisis de un conjunto de variables, como las condiciones técnicas y económicas” (Secretaría de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONU/IDI), Noviembre, 2000).

La matriz está conformada por filas y columnas, en las filas se encuentran las respectivas tecnologías a evaluar, en las columnas se ubican los parámetros que fueron evaluados de manera cuantitativa, con el fin de escoger de manera objetiva la tecnología (Dellavedova, 2016).

En el siguiente apartado se describen los criterios seleccionados para evaluar las tecnologías:

5.2.1. Residuo Aprovechable

Son aquellos residuos que pueden aprovecharse por las tecnologías, dado a su poder calorífico (Moratorio, Rocco, & Castelli, 2012), de acuerdo a la información de la UAESP para el relleno sanitario Doña Juana, estos residuos son; cartón, caucho, cuero, madera, materia orgánica, papel, textiles y plásticos.

En la tabla 5 se encuentran los residuos que pueden ser aprovechados por cada una de las tecnologías, a cada tecnología se le asignó un porcentaje que depende de la cantidad de residuos que puede aprovechar.

Tabla 5. Puntuación respecto a los residuos susceptibles a aprovechamiento térmico

Cantidad de Residuos	Tipos de residuos Susceptibles a Aprovechamiento térmico en el RSDJ	Puntuación
1	Madera	12,5 %
4	papel, cartón, madera y algunos plásticos seleccionados	50%
8	cartón, caucho, cuero, madera, materia orgánica, papel, textiles y plásticos	100%

Fuente: Elaborado por los Autores con información de la UAESP (2017)

Tabla 6. Residuos Aprovechables por las diferentes tecnologías

Tecnología	Residuos	Descripción
Incineración	Permite incinerar cualquier tipo de residuo	Al ser una tecnología que no es restrictiva a la hora de incinerar los residuos, se puede aprovechar todos los residuos, es decir el 100% de los residuos seleccionados para el Relleno Sanitario Doña Juana.

Tecnología	Residuos	Descripción
Pirolisis	Permite aprovechar papel, cartón, madera y algunos plásticos seleccionados	Al ser estos residuos lo más aptos para la tecnología de pirolisis, se aprovecha un 50% de los residuos seleccionados para el Relleno Sanitario Doña Juana.
Gasificación	Permite aprovechar madera	Este residuo corresponde al 12,5% de los residuos seleccionados para el Relleno Sanitario Doña Juana.

Fuente:(Instituto para Diversificación y Ahorro de Energía, Madrid, 2011); (Torre Torre, 2013); (Zapata Meneses & Estrada, Agosto 2004).

En la siguiente tabla se consolidó los rangos de calificación y escala para el parámetro a evaluar, se obtuvo a partir de la división del porcentaje total (100%) entre el número de las tecnologías a evaluar (3), el resultado se convirtió en el rango que se utilizó para calificar las tecnologías dependiendo de la tabla 5.

Tabla 7. Rango de Evaluación

Rangos de Evaluación		
Calificación	Escala	Descripción
Mínima	1	El aprovechamiento de los residuos está dentro de un rango de 0 a 32 % de los RSU.
Media	2	El aprovechamiento de los residuos está dentro de un rango de 33 a 66 % de los RSU.
Alta	3	El aprovechamiento de los residuos está dentro de un rango de 67 a 100 % de los RSU.

Fuente: Elaborado por los Autores (2017)

5.2.2 Pre tratamiento

Las tecnologías requieren que los residuos posean ciertas características físicas específicas como el tamaño y contenido de humedad para ser aprovechados, deben acondicionarse si la tecnología lo requiere, esto asegura un mejor aprovechamiento de los RSU (Armengol, Grau; Farré, Oriol, 2011).

El acondicionamiento de los residuos implica costos por lo cual se evaluó este parámetro teniendo como premisa que entre más procesos se requieran para el

acondicionamiento de los residuos habrán más costos y su evaluación es menor (Ibañez & Corropoli, 2002). En la tabla 8 se encuentran los requisitos de pre tratamiento que deben cumplir los residuos para ser aprovechados por cada una de las tecnologías y en la tabla 9 los rangos de calificación y escala para el parámetro de pre tratamiento.

Tabla 8. Requisitos de *pre tratamiento* de los residuos

Tecnología	Requiere pre tratamiento		Selección del residuo	Secado	Triturado
	SI	NO			
Incineración	X			X	X
Pirolisis	X		X	X	X
Gasificación	X		X	X	X

Fuente: (Armengol, Grau; Farré, Oriol, 2011) (MÍGUEZ TABARÉS, 2016)

Tabla 9. Rango de evaluación

Rangos de Evaluación		
Calificación	Escala	Descripción
Moderada	1	Son necesarios 3 o más de 3 pre tratamientos
Alta	2	Entre 1-2 pre tratamientos

Fuente: Elaborado por los Autores (2017)

5.2.3 Productos

Las tecnologías (incineración, gasificación y pirólisis) procesan los residuos sólidos urbanos y los transforman, se obtiene como resultado productos útiles para la recuperación energética, es decir sustancias en diferentes estados que son utilizadas como combustibles (Armengol, Grau; Farré, Oriol, 2011), en la tabla 10 se consolidó los productos que genera cada una de las tecnologías, en la tabla 11 los rangos de calificación y escala para el parámetro de productos.

Tabla 10. Productos

Tecnología	Estado del producto	Descripción
------------	---------------------	-------------

	Sólido	Líquido	Gas	
Incineración			X	Produce gases calientes de combustión
Pirolisis	X	X	X	Los productos son; el carbón vegetal, alquitranes, bioaceites, ácidos orgánicos y Gas de síntesis.
Gasificación		X	X	Gas de síntesis y Alquitranes

Fuente: (SEDESOL, 2007) (Arauzo , Bimbela, Ábrego, Gonzalo, & Sánchez, 2014) (Alexánder , Klose, & Rincón , 2008) (Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, Tecnologías de Conversión Térmica, 1998)

Tabla 11. Rango de Evaluación

Rangos de Evaluación		
Calificación	Escala	Descripción
Mínima	1	La tecnología obtiene 1 productos
Media	2	La tecnología obtiene 2 productos
Alta	3	La tecnología obtiene 3 productos

Fuente: Elaborado por los Autores (2017)

5.2.4 Temperatura de operación

Una de las características generales e indispensables de las tecnologías es la temperatura de funcionamiento, las altas temperaturas transforman los RSU en gases, este proceso libera energía en forma de calor y el vapor generado produce electricidad (Martín, 2003) (Arvizu Fernández, Agosto 2010).

Las temperaturas típicas de operación de las tecnologías se encuentran en la tabla 12. La tabla 13 contiene los rangos de calificación y escala para el parámetro de temperatura, se tomó valores mínimos de operación para evaluar la temperatura.

Tabla 12. Temperatura estimada por diferentes referencias bibliográficas.

Temperatura	Tecnología		
	Incineración	Pirolisis	Gasificación
No 1	>850°C	300°- 800° C	400°- 600° C
No 2	600°-1.300° C	400°- 800° C	>750° C
No 3	850°-1.100° C	700°- 800° C	900°- 1.000° C

Fuente: (Armengol, Grau; Farré, Oriol, 2011) (MÍGUEZ TABARÉS, 2016) (Torre Torre, 2013) (Martín, 2003) (Amaya Romero, 2014)

Tabla 13. Rango de Evaluación

Rangos de Evaluación		
Calificación	Escala	Descripción
Mínima	1	600 °C
Media	2	400 °C
Alta	3	300 °C

Fuente: Elaborado por los Autores (2017)

5.2.5 Capacidad de tratamiento (Tonelada/día)

El tamaño de las instalaciones para el aprovechamiento de residuos varía mucho, un ejemplo de esto se da en Europa, donde se observa varios tamaños para una misma tecnología y donde se evidencia variaciones en los residuos procesados, esto incrementa o disminuye la capacidad que poseen dichas tecnologías a la hora de tratar los residuos sólidos, para generar energía y disminuir el volumen de los residuos (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2011).

La tabla 14 muestra los rangos de típicos de la capacidad de tratamiento de las tecnologías en Tonelada/día, en la tabla 15 se consolidó los rangos de calificación y escala para la capacidad de tratamiento. Este parámetro se evaluó dando el máximo valor a la tecnología con mayor capacidad de tratamiento diario porque permite una mayor reducción en el volumen de RSU.

Tabla 14. Rango de capacidad de tratamiento típico de las tecnologías

Tecnología	Rango Tonelada/día
Incineración	120 – 720
Pirólisis	10 – 100
Gasificación	250 – 500

Fuente: (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2011)

Tabla 15. Rango de Evaluación

Rangos de Evaluación		
Calificación	Escala	Descripción
Mínima	1	100 T/d
Media	2	500 T/d
Alta	3	720 T/d

Fuente: Elaborado por los Autores (2017)

5.2.6 Eficiencia

La eficiencia está relacionada con el rendimiento de la máquina, específicamente al trabajo que realiza esta, frente al contexto de valorización de residuos sólidos nos remitimos al trabajo que requiere el sistema para transformar los residuos en energía eléctrica o calor (Medina Dominguez & Ovejero Sánchez, 2010).

La termodinámica indica que el rendimiento está en función del calor o la temperatura por lo cual al evaluar procesos térmicos se tuvo presente esta variable (Medina Dominguez & Ovejero Sánchez, 2010), la tabla 16 muestra el rango de eficiencia de las tecnologías, la tabla 17 los rangos de calificación y escala para este parámetro.

Tabla 16. Eficiencias de las Tecnologías

Tecnología	Eficiencia
Incineración	24-28%
Gasificación	65-75%
Pirólisis	30-90%

Fuente: (Sánchez Tolosa, 2012); (Martínez de León, Celia, 2016)

Tabla 17. Rango de Evaluación

Rangos de Evaluación		
Calificación	Escala	Descripción
Mínima	1	El proceso de incineración tiene en cuenta la heterogeneidad de los residuos o combustible que ingresa al sistema, esta condición reduce la eficiencia del proceso en un rango del 24-28% . Se debe entender que esta eficiencia del sistema contempla las eficiencias de la caldera, turbina y el generador (Morales Gilede, 1984).
Media	2	El proceso necesita temperaturas altas entre los 700-1200° C, el gas obtenido y la energía térmica asociada a este se pueden transformar en vapor y generar electricidad por medio de una turbina y un generador, el rendimiento típico de este sistema oscila entre el 65-75% (Martínez de León, Celia, 2016).
Alta	3	La temperatura que requiere el proceso oscila en los 500° C, su eficiencia depende de la generación de energía eléctrica o calor, ya que para la primera requiere motores y para ciclos combinados turbinas, dependiendo del sistema que se vaya a implementar su

Rangos de Evaluación		
Calificación	Escala	Descripción
		rendimiento típico está en un rango del 30-90% de eficiencia, siendo más eficiente el ciclo combinado porque usa motores con potencias iguales o menores a los 10MW, la eficiencia del proceso está entre el 60% y 70% (Martínez de León, Celia, 2016).

Fuente: Elaborado por los Autores (2017)

5.2 7. Vida útil

La vida útil media hace referencia al tiempo o periodo por el cual la maquinaria del sistema de valorización está en condiciones óptimas para su funcionamiento y uso pertinente, se estima desde el momento de construcción e implementación del sistema (Cerdá, 2009), la tabla 18 muestra la vida útil de cada una de las tecnologías, en la tabla 18 se encuentran los rangos de calificación.

Tabla 18. Vida Útil de la Tecnología

Tecnología	Vida Útil (media) años
Incineración	30
Gasificación	7
Pirólisis	5-7

Fuente: (Cerdá, 2009), (FAO - Roma, 1993), (Xinxiang Doing , 2016)

Tabla 19. Rango de Evaluación

Rangos de Evaluación		
Calificación	Escala	Descripción
Mínima	1	La vida útil del reactor requerido para el sistema de una planta de Pirólisis es de 5-7 años, depende del fabricante y del material con que se fabrique, generalmente es acero (Xinxiang Doing , 2016).

Rangos de Evaluación		
Calificación	Escala	Descripción
Media	2	Las plantas de gasificación requieren estructuras especiales para obtener y transportar el gas de síntesis, dichas conexiones se pueden ver afectadas por la generación de alquitrán (cenizas), esto no permite la continuidad del flujo, por lo cual se estima una vida útil de 7 años, si se realiza el respectivo mantenimiento a las estructuras (FAO - Roma, 1993).
Alta	3	30 años de vida útil la tecnología del proceso de incineración, cuenta con una infraestructura que puede ser diseñada in situ con materiales resistentes (concreto), incluye los elementos de manera interna por lo que al no quedar a la intemperie se reducen costos y prologa la vida útil (Cerdá, 2009).

Fuente: Elaborado por los Autores (2017)

5.2.8 Costos

Para realizar la evaluación de las tres tecnologías se tuvo en cuenta el costo de inversión y el costo por tonelada procesada, estos costos son información manejada por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente y la Organización Panamericana de la Salud CEPIS/OPS. El Costo de inversión hace referencia a la sumatoria de los costos de estudios previos, instalación del proyecto, compra del terreno, divididos por la cantidad de residuos requeridos para la operación diaria de la planta (Toneladas/ día) (Gobierno de Chile, 2001). Los costos estimados no tienen en cuenta costos por pre tratamiento de los residuos.

INCINERACIÓN: El rango de valores indicado por el CEPIS/OPS respecto a los **costos de inversión** por tonelada instalada para una planta incineradora son desde US \$125.000 a USD \$160.000. Para el caso de plantas con recuperación de energía en el Reino Unido oscilan los costos entre 59 y 118 millones de dólares, para plantas con una capacidad específica desde 200.000 a 400.000 toneladas/año (Gobierno de Chile, 2001).

El **costo por tonelada** procesada en los países de la Unión Europea varían entre US\$30/ton Y US\$125/ton, este costo es por una tonelada incinerada de residuos

sólidos no peligrosos. En Estados Unidos el costo promedio es de US\$ 60/ton (Gobierno de Chile, 2001).

El Relleno Sanitario Doña Juana (RSDJ) maneja en promedio 200.000 toneladas mensuales y 2.400.000 ton/año, de acuerdo con la información de la UAESP de los residuos dispuestos en el año 2015-2016, el costo de inversión y por tonelada se calculó para la incineración de los residuos cartón, caucho, cenizas, cuero, madera, materia orgánica, papel, plástico, textil, metales y vidrio.

La fluctuación en el precio del dólar incidirá en los costos ya estimados, por temas prácticos se tomó el valor de día 04 de noviembre de 2016, donde la tasa de cambio es \$ 1 USD= \$ 2,894 COP (DÓLAR-COLOMBIA, 2016). Se contempló tres escenarios de costos de acuerdo al rango que estableció el CEPIS, ya que estos valores pueden variar de acuerdo al tipo de residuo, el tamaño y capacidad instalada.

El cálculo se realizó para los costos de inversión y tonelada de acuerdo a la siguiente ecuación:

Ecuación 8. Estimación de Costos De Inversión Planta Incineradora (CIPi).

$$CIPi = \frac{PPI}{CTT} \times CRI$$

Donde:

CIPi: Estimación de Costos De Inversión Planta Incineradora en pesos

PPI: Es el precio de la planta incineradora en pesos colombianos

CTT: Cantidad de toneladas que puede tratar la planta incineradora

CRI= Cantidad total de residuos a incinerar año 2015

Se estimó el costo por tonelada de la planta incineradora con la siguiente ecuación:

Ecuación 9. Estimación de Costos de operación Planta Incineradora (COPI).

$$COPI = \frac{CPT}{CT} \times TRI$$

Donde:

COPI: Costos de operación Planta Incineradora en pesos

CPT: Costo por tonelada incinerada

CT: Cantidad de residuos tratados en toneladas

TRI: Total de residuos a incinerar en toneladas por mes

PIRÓLISIS: El rango de valores para el **costo de inversión** de una planta de pirolisis en el Reino Unido varía desde los US\$ 210- 340, para una planta de 30.000 Ton/año su costo de inversión es de US\$ 6 A 10 millones, con base al informe “Renewable Energy Information Office” (Gobierno de Chile, 2001).

El **costo por tonelada** procesada varían entre US\$30/ton y US\$70/ton, este costo es por una tonelada incinerada de los residuos como el plástico triturado, papel y materia orgánica (comida y residuos de poda) (Gobierno de Chile, 2001). El Relleno Sanitario Doña Juana (RSDJ) maneja en promedio 160.000 toneladas mensuales y 1.800.000 ton/año, de los residuos mencionados anteriormente.

GASIFICACIÓN: Una planta gasificadora tiene como **costos de inversión** valores que oscilan desde los US \$200 a los US \$350 (TON/AÑO), los costos por tonelada procesada varían desde los US\$ 40 a US\$ 85 por tonelada (Gobierno de Chile, 2001). El Relleno Sanitario Doña Juana (RSDJ) maneja en promedio 11.000 toneladas mensuales y 56.000 ton/año, de madera (residuo).

La evaluación se estableció conforme a los costos de inversión y costos por tonelada de los tres sistemas:

Tabla 20. Rango de Evaluación

Rangos de Evaluación		
Calificación	Escala	Descripción
Mínima	1	La planta gasificadora sólo aprovecha un tipo de residuo, es la tecnología más económica, sin considerar los costos de mantenimiento que implica la planta gasificadora y el pre tratamiento del residuo (secado madera).
Media	2	Las plantas de Pirólisis no tratan todos los residuos, sus costos están en los mismos rangos de una planta incineradora, sin considerar los costos por el pre tratamiento de los residuos (plástico triturado).

Rangos de Evaluación		
Calificación	Escala	Descripción
Alta	3	Una planta incineradora implica mayor inversión de acuerdo al precio más alto en el mercado, el precio más bajo es inferior a los costes de inversión de una planta de Pirólisis y sus costos de funcionamiento mensual oscilan en los mismos rangos de la planta de Pirólisis.

Fuente: Elaborado por los Autores (2017)

5.2.9. Porcentaje de reducción de volumen del residuo

Al finalizar el proceso de aprovechamiento de los residuos sólidos urbanos, en cada tecnología queda un remanente, las tecnologías reducen el volumen de los RSU hasta en un 95% del total de los residuos, dependiendo de la tecnología (Hernández Cid, 2010).

Esto contribuye a que los sobrantes que se generan a partir de los RSU ocupen menos espacio a la hora de la disposición final, la gestión y disposición de los remanentes se lleva a cabo en un confinamiento (Instituto de Investigaciones Eléctricas, IIE, Octubre 2012). La tabla 27 muestra los porcentajes considerados para las tecnologías y la tabla 27 los rangos de calificación y escala para el parámetro.

Tabla 21. Porcentaje de Reducción del Volumen de RSU

Tecnología	Porcentaje de reducción
Incineración	80% - 95%
Pirólisis	70% - 90%
Gasificación	95%

Fuente: (Hernández Cid, 2010) (SEDESOL, 2007) (Instituto de Investigaciones Eléctricas, IIE, Octubre 2012)

Tabla 22. Rango de Evaluación

Rangos de Evaluación		
Calificación	Escala	Descripción
Moderada	1	Supone una reducción del volumen de RSU hasta un límite de 90%
Alta	2	Supone una reducción del volumen de RSU hasta un límite de 95%

Fuente: Elaborado por los Autores (2017)

5.2.10 Emisiones de Gases y partículas

En las diferentes tecnologías de valorización de RSU se producen una serie de emisiones de gases y partículas que deben ser controladas para dar cumplimiento con el marco normativo correspondiente y mitigar las emisiones producidas a causa de la combustión de los residuos sólidos, a través de procesos o medidas que controlen la contaminación atmosférica, por ejemplo el uso de; filtros de manga, precipitadores electrostáticos, separación en el origen, control de la combustión etc. (Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, Tecnologías de Conversión Térmica, 1998).

En el siguiente la tabla 29 se dispuso la tecnología y su contribución frente a la emisión de gases y partículas, en la tabla 30 se establece los rangos de evaluación para este parámetro.

Tabla 23. Contribución de las tecnologías respecto a las emisiones

Tecnología	Emisiones
Incineración	Puede generar sustancias muy tóxicas, el control y la reducción de las emisiones se realiza por medio de procesos complejos
Pirólisis	Por ser un sistema cerrado se reducen las emisiones, se necesitarán teóricamente un tratamiento menor

Tecnología	Emisiones
Gasificación	Logra bajas emisiones de gases contaminantes con mecanismos simples

Fuente: (Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, Tecnologías de Conversión Térmica, 1998) (Instituto Nacional De Tecnología Industrial, 2010) (Armengol, Grau; Farré, Oriol, 2011) (Martínez de León, Celia, 2016)

Tabla 24. Rango de Evaluación

Rangos de Evaluación		
Calificación	Escala	Descripción
Moderada	1	Se estiman bajas emisiones con sistemas de control sencillos
Alta	2	Se evalúan el control de las emisiones con sistemas de control complejos

Fuente: Elaborado por los Autores (2017)

5.3 Capacidad y Eficiencia Eléctrica de la tecnología priorizada

Se debe considerar cuantos días va a funcionar la planta o las plantas durante el año para establecer el tiempo de funcionamiento y posteriormente la capacidad de tratamiento mínima de acuerdo a la cantidad de residuos a tratar.

5.3.1 Eficiencia De La Tecnología

La generación de energía eléctrica de la planta incineradora de residuos sólidos, depende del potencial energético de los residuos sólidos dispuestos en el RSDJ y la eficiencia global del sistema, o sea la eficiencia de cada componente o tecnología (caldera, turbina y generador), por lo que se multiplicó la eficiencia de cada equipo.

La eficiencia global se estimó con base a la información recopilada en la revisión bibliográfica, se identificó tres diferentes eficiencias para una planta de incineración de lecho fluidizado rotativo, por lo cual se halló la eficiencia del sistema del RSDJ por medio del promedio de éstas, para posteriormente comparar los escenarios posibles para la generación de energía eléctrica.

5.3.2 Generación De Energía Eléctrica

La generación de energía eléctrica de la planta incineradora de residuos sólidos, se determinó multiplicando el potencial energético de los residuos sólidos dispuestos en el

RSDJ por la eficiencia global del sistema, considerando la eficiencia máxima, promedio y mínima para la incineración de RSU. Se estimó la cantidad de energía eléctrica que se podría producir mensualmente durante el año 2015 y el primer semestre del año 2016.

5.4 Estimación Reducción de Emisiones

5.4.1 Emisiones Relleno Sanitario

Para el escenario del RSDJ se desarrolló la estimación para un periodo de un año, con la información recopilada el nivel de la metodología que se adapta es el 1, este nivel “se basa en el método FOD del IPCC que usa principalmente datos por defecto de la actividad y parámetros por defecto” (IPCC, 2006).

El dato principal para realizar el cálculo es la cantidad de carbono orgánico degradable disuelto (DDOC) por sus siglas en inglés denominado (DDCO_m) ecuación 12, este hace referencia al carbono orgánico que se degrada en un medio anaeróbico y donde el índice **m** es la masa.

El resultado del DDCO_m se obtuvo al multiplicar la cantidad de residuos (**W**), por la fracción de carbono orgánico degradable almacenado en los residuos (**DOC**), por la fracción de carbono orgánico degradable que se descompone anaeróbicamente (**DOC_f**) y por el factor de corrección de metano (**MCF**), visto como la descomposición en condiciones aerobias antes de pasar a condiciones anaerobias en los SEDS (IPCC, 2006)

Ecuación 10. COD disuelto a partir de los datos sobre la eliminación de desechos.

$$DDOCm = W * DOC * DOCf * MCF$$

Donde

DDOCm = “masa del DDOC depositado, Gg” (IPCC, 2006)

W = “masa de los desechos depositados, Gg” (IPCC, 2006)

DOC = “carbono orgánico degradable durante el año de deposición, fracción, Gg de C/Gg de desechos” (IPCC, 2006)

DOC_f = “fracción del DDOC que puede descomponerse (fracción)” (IPCC, 2006)

MCF = “Factor de corrección de CH₄ para la descomposición aeróbica durante el año de deposición (fracción)” (IPCC, 2006)

Con la ecuación número 11 se determina el potencial de generación de metano (CH₄).

Ecuación 11. Transformación de $DDOC_m$ en Lo

$$Lo = DDOCm * F * \frac{16}{12}$$

Fuente: (IPCC, 2006)

Donde:

Lo = "potencial de generación de CH_4 , Gg de CH_4 " (IPCC, 2006)

$DDOCm$ = "masa del DOC disuelto depositado, Gg" (IPCC, 2006)

F = "fracción de CH_4 en el gas de vertedero generado (fracción de volumen)" (IPCC, 2006)

$16/12$ = "cociente de pesos moleculares CH_4/C (cociente)"

Parámetros y factores de emisión:

1. Carbono orgánico degradable (DOC)

Es el carbono orgánico de los residuos que alcanzan a descomponerse bioquímicamente, su unidad de expresión es en Gigagramos (Gg) de C por Gg de residuos, la ecuación número 12 permite calcular el DOC con datos por defecto del contenido de carbono (IPCC, 2006).

Ecuación 12. Estimación del DOC con los valores de contenido de carbono por defecto

$$DOC = \sum_i (DOC_i * W_i)$$

Fuente: (IPCC, 2006)

Donde:

DOC = "fracción de carbono orgánico degradable en los desechos brutos, Gg de C/Gg de desechos" (IPCC, 2006)

DOC_i = "fracción de carbono orgánico degradable en los desechos de tipo i " (IPCC, 2006)

W_i = "fracción de tipo de desecho i por categoría de desecho" (IPCC, 2006)

Para desarrollar la ecuación 12 fue necesario conocer los valores de la fracción de carbono orgánico degradable en los desechos de tipo i (DOC_i), esta composición

depende del país, región, tiempo, etc., al no contar con dicha información específica del RSDJ, se trabajó con los valores por defecto.

El DOC; denominado contenido de DOC en %, está estipulado para diferentes desechos húmedos, se obtuvieron por el análisis de muestras tomadas de SEDS o plantas incineradoras (IPCC, 2006).

Tabla 25. Valores Por Defecto Para Contenidos De Materia Seca, DOC, Total De Carbono Y Fracción De Carbono Fósil En Varios Componentes De DSM

Componente de DSM	Contenido de materia seca en % del peso húmedo ¹	Contenido de DOC en % de desechos húmedos		Contenido de DOC en % de desechos secos		Contenido total en % del peso en seco		Fracción de carbono fósil en % del total de carbono	
		Por defecto	Rango	Por defecto	Rango ²	Por defecto	Rango	Por defecto	Rango
Papel/cartón	90	40	36-45	44	40-50	46	42-50	1	0-5
Textiles ³	80	24	20-40	30	25-50	50	25-50	20	0-50
Desechos de alimentos	40	15	8-20	38	30-50	38	20-50	-	-
Madera	85	43	39-46	50	46-54	50	46-54	-	-
Desechos de jardines y parques	40	20	18-22	49	45-55	49	45-55	0	0
Pañales	40	24	18-32	60	44-88	70	54-90	10	10
Caucho y cuero	84	(39) ⁵	(39) ⁵	(47) ⁵	(47) ⁵	67	67	20	20
Plásticos	100	-	-	-	-	75	67-85	100	95-100
Metales ⁶	100	-	-	-	-	ND	ND	ND	ND
Vidrio ⁶	100	-	-	-	-	ND	ND	ND	ND
Otros, desechos	90	-	-	-	-	3	0-5	100	50-100

Componente de DSM	Contenido de materia seca en % del peso húmedo ¹	Contenido de DOC en % de desechos húmedos		Contenido de DOC en % de desechos secos		Contenido total en % del peso en seco		Fracción de carbono fósil en % del total de carbono	
		Por defecto	Rango	Por defecto	Rango ²	Por defecto	Rango	Por defecto	Rango
inertes									

ND = datos no disponibles

¹ El contenido de humedad presentado aquí se refiere a estos tipos específicos de desechos antes de que entren a la recolección y el tratamiento. Por ejemplo, en muestras sacadas de los desechos recolectados o de los SEDS, el contenido de humedad de cada tipo de desecho varía según la humedad de los desechos coexistentes y el tiempo durante la gestión.

² El rango de valores corresponde a los valores mínimos y máximos declarados por Dehoust et al., 2002; Gangdonggu, 1997; Guendehou, 2004; JESC, 2001; Jager y Blok, 1993; Würdinger et al., 1997; y Zeschmar-Lahl, 2002.

³ Por defecto, se supone que el 40 por ciento de los desechos son de origen sintético. Dictamen de experto de los autores.

⁴ Este valor corresponde a productos de madera en final de vida. El contenido típico de materia seca en la madera al tiempo de la recolección (para desechos de jardín y parque) es de 40 por ciento. Dictamen de experto de los autores.

⁵ Los cauchos de origen natural probablemente no se degradarán en condiciones anaeróbicas en los SEDS (Tsuchii et al., 1985; Rose y Steinbüchel, 2005).

⁶ El metal y el vidrio contienen un poco de carbono fósil.

Fuente: (IPCC, 2006)

Con base a la información de la siguiente tabla se debe determinar el factor de corrección y el factor de carbono degradable por defecto en la tabla anterior, dado a que no se cuenta con la información específica.

Tabla 26. Clasificación de los SEDS y factores de corrección de metano (MCF)

TABLA 3.1 CLASIFICACIÓN DE LOS SEDS Y FACTOR DE CORRECCIÓN DE METANO (MCF)	
Tipo de sitio	Valor por defecto del Factor de corrección de metano (MCF, del inglés, <i>Methane Correction Factor</i>)
Gestionado – anaeróbico ¹	1,0
Gestionado - semi-aeróbico ²	0,5
No gestionado ³ - profundo (< 5 m desechos) y/o capa freática elevada.	0,8
No gestionado ⁴ - poco profundo (< 5 m de desechos)	0,4
SEDS no categorizado ⁵	0,6

Sitios anaeróbicos no gestionados de eliminación de desechos sólidos: Deben implementar la colocación controlada de los desechos (o sea: los desechos son dirigidos a áreas específicas de deposición donde se ejerce un cierto control sobre la recuperación informal de residuos reciclables y la quema de basuras) e incluir por lo menos uno de los siguientes elementos: (i) material protector de la cubierta; (ii) compactación mecánica o (iii) nivelación de los desechos.

² Sitios semi-aeróbicos gestionados de eliminación de desechos sólidos: deben garantizar la ubicación controlada de los desechos e incluir todas las estructuras siguientes para introducir aire en las capas de desechos: (i) material de la cubierta permeable; (ii) sistema de drenaje para la lixiviación; (iii) estanques de regulación y (iv) sistema de ventilación de gases.

³ Sitios no gestionados de eliminación de desechos sólidos - profundos y/o con capa freática elevada: Todos los SEDS que no cumplen con los criterios de los SEDS gestionados y que tienen profundidades mayores o iguales a 5 metros y/o una capa freática elevada cercana al nivel del suelo. La última situación corresponde al llenado con desechos de un terreno con aguas fluviales, como un estanque, río o humedal.

⁴ Sitios no gestionados poco profundos de eliminación de desechos sólidos: todos los SEDS que no cumplen con los criterios de los SEDS gestionados y que tienen profundidades de menos de 5 metros.

⁵ Sitios no categorizados de eliminación de desechos sólidos: Sólo si los países no pueden categorizar sus SEDS dentro de las cuatro anteriores categorías de SEDS gestionados y no gestionados pueden emplear el MCF para esta categoría.

Fuente: (IPCC, 2006)

5.4.2 Estimación de emisiones del Sistema de Incineración

5.4.2.1 Estimación de emisiones de CO₂

El cálculo de emisiones de CO₂ para el Relleno Sanitario Doña Juana se estimó a partir de la siguiente ecuación, se consideró los residuos dispuestos en el año 2015 y su aprovechamiento energético por el sistema de incineración de lecho fluidizado rotativo.

Ecuación 13. Estimación de las emisiones de CO₂ basada en la composición de los DSM (ECO₂)

$$ECO_2 = DSM \times \sum_j (WF_j \times dm_j \times CF_j \times FCF_j \times OF_j) \times 44/12$$

Fuente: (IPCC, 2006)

Donde las variables de la ecuación son:

ECO₂: “emisiones de CO₂ durante el año del inventario, Gg/año” (IPCC, 2006)

DSM: “Cantidad total de desechos sólidos municipales en peso húmedo incinerados o quemados por incineración abierta, Gg/año” (IPCC, 2006)

WF_j: “fracción de tipo/material de desechos del componente j en los DSM (en peso húmedo incinerados o quemados por incineración abierta)” (IPCC, 2006)

Dm_j: “contenido de materia seca en el componente j de los DSM incinerados o quemados por incineración abierta, (fracción)” (IPCC, 2006)

CF_j: “fracción de carbono en la materia seca (es decir, contenido de carbono) del componente j, (fracción)” (IPCC, 2006)

FCF_j: “fracción de carbono fósil en el carbono total del componente j” (IPCC, 2006)

OF_j: “factor de oxidación, (fracción)”

44/12: “Factor de conversión de C en CO₂” (IPCC, 2006)

J: “componente de los DSM incinerado/sometido a incineración abierta, como papel/cartón, textiles, desecho de alimentos, madera, desecho de jardines y parques, pañales desechables, caucho y cuero, plásticos, metal, vidrio, otros desechos inertes” (IPCC, 2006). Las variables DSM y WF_j hacen referencia a la cantidad de residuos húmedos y a la fracción o tipo de material.

Los valores por defecto de la fracción de carbono, fracción de carbono fósil y el contenido de materia seca que se utilizaron son los proporcionados por la metodología, en marcado en la siguiente ilustración.

Ilustración 7. Valores Por Defecto Para Contenidos De Materia Seca, DOC, Total De Carbono Y Fracción De Carbono Fósil En Varios Componentes De DSM

VALORES POR DEFECTO PARA CONTENIDOS DE MATERIA SECA, DOC, TOTAL DE CARBONO Y FRACCIÓN DE CARBONO FÓSIL				FACTORES DE EMISIÓN INCINERACION POR LECHO FLUIDIZADO DE DSM		
Componente DSM	Contenido de materia seca en % de peso humedo	Contenido de Total de Carbono en % del peso en seco	Fracción de carbono fósil en % del total de carbono	Factor de Oxidación en % de la entrada de carbono CO ₂	(Kg/Gg de desechos incinerados sobre una base de peso húmedo) CH ₄	(g de N ₂ O/tonelada de DSM incinerados) N ₂ O
Cartón	90%	46%	1%	100	0	50
Caucho	84%	67%	20%	100	0	50
Cenizas	0%	0%	0%	100	0	50
Cerámica	0%	0%	0%	100	0	50
Cuero	84%	67%	20%	100	0	50
Hueso	40%	38%	-	100	0	50
Ladrillo	0%	0%	0%	100	0	50
Madera	85%	50%	-	100	0	50
Materia Orgánica	40%	38%	-	100	0	50
Metales	100%	ND	ND	100	0	50
Minerales	0%	0%	0%	100	0	50
Papel	90%	46%	1%	100	0	50
Plástico	100%	75%	100%	100	0	50
Textil	80%	50%	20%	100	0	50
Vidrio	100%	ND	ND	100	0	50
Otros	90%	3%	100%	100	0	50

Fuente: (IPCC, 2006)

El contenido de carbono total depende de los residuos, si es carbón biogénico como en el caso del papel o alimentos (biomasa) o por lo contrario fracción de carbono fósil de los combustibles fósiles como el plástico (IPCC, 2006). Los factores de emisión se seleccionaron de acuerdo al sistema de incineración que se implementará, en este caso es una incineración continua de lecho fluidizado rotativo. Los datos no disponibles (ND) se consideraron como un valor de cero.

De acuerdo a esto se diseñó la siguiente tabla con los residuos específicos a ser aprovechados en el RSDJ por la tecnología de incineración de lecho fluidizado rotativo, se caracterizó cada una de las variables de la ecuación 15 para cada uno.

Tabla 27. Datos para determinar las emisiones de CO₂

	Dm	CF	FCF	OF
Componente DSM	Contenido de materia seca en % de peso húmedo	Contenido Total de Carbono en % del peso seco	Fracción de carbono fósil en % del total de carbono	Factor de Oxidación en % de la entrada de carbono CO ₂
Cartón	90%	46%	1%	100%
Caucho	84%	67%	20%	100%
Cenizas	0%	0%	0%	100%
Cerámica	0%	0%	0%	100%
Cuero	84%	67%	20%	100%
Hueso	40%	38%	0%	100%
Ladrillo	0%	0%	0%	100%
Madera	85%	50%	0%	100%
Materia Orgánica	40%	38%	0%	100%
Metales	100%	0%	0%	100%
Minerales	0%	0%	0%	100%
Papel	90%	46%	1%	100%
Plástico	100%	75%	100%	100%
Textil	80%	50%	20%	100%

Fuente: (IPCC, 2006)

Tabla 28. Valores de ecuación para la Estimación de emisiones

(WF × dm × CF × FCF × OF)	
Cartón	0,55
Caucho	2,71

(WF × dm × CF × FCF × OF)	
Cenizas	0,00
Cerámica	0,00
Cuero	1,85
Hueso	0,00
Ladrillo	0,00
Madera	0,00
Materia Orgánica	0,00
Metales	0,00
Minerales	0,00
Papel	0,73
Plástico	425,95
Textil	17,09
Vidrio	0,00
Σ	448,88

Fuente: Elaborado por los Autores (2017)

5.4.2.2 Estimación de emisiones de CH_4

Para calcular la estimación de emisiones la metodología IPCC propone la siguiente ecuación para el nivel 1.

Ecuación 14. Estimación de las emisiones de CH_4 basada en la cantidad total de desechos quemados

$$Emisiones\ de\ CH_4 = \sum_i (IW_i \times EF_i) \times 10^{-6}$$

Fuente: (IPCC, 2006)

Donde las variables de la ecuación son:

IW_i: “cantidad de desechos sólidos de tipo *i* incinerados o quemados por incineración abierta, Gg/año” (IPCC, 2006)

EF_i: “factor de emisión de CH₄ agregado, kg. De CH₄/Gg de desechos” (IPCC, 2006)

10⁻⁶: “factor de conversión de kilogramos en Gigagramos” (IPCC, 2006)

I: “categoría o tipo de desecho incinerado/quemado al aire libre especificado de la manera siguiente:

DSM: desechos sólidos municipales” (IPCC, 2006)

5.4.2.3 Estimación de emisiones de N₂O

La estimación se efectuara reemplazando las variables de la ecuación de nivel 1:

Ecuación 15. Estimación de las emisiones de N₂O basada en la entrada de desechos a los incineradores

$$\text{Emisiones de N}_2\text{O} = \sum_i (IW_i \times EF_i) \times 10^{-6}$$

Fuente: (IPCC, 2006)

Donde las variables para la ecuación son:

IW_i: “cantidad de desechos de tipo *i* incinerados o quemados por incineración abierta, Gg/año” (IPCC, 2006)

EF_i: “factor de emisión de N₂O (kg. De N₂O/Gg de desechos) para desechos de tipo *i*” (IPCC, 2006)

10⁻⁶: “factor de conversión de kilogramos en Gigagramos” (IPCC, 2006)

I: “categoría o tipo de desecho incinerado/quemado al aire libre especificado de la manera siguiente:

DSM: desechos sólidos municipales” (IPCC, 2006)

5.4.2.4 Reducción de emisiones

La reducción de emisiones asociadas a la implementación de un Sistema de valorización de RSU con recuperación de energía eléctrica se determinó por medio de la siguiente ecuación.

Ecuación 16. Reducción de emisiones

$$RE = (Emisiones RSDJ + Emisiones E.E) - Emisiones Inc$$

Fuente: Elaborada por los Autores (2017)

Donde:

RE = Reducción de emisiones en toneladas equivalentes de CO₂

Emisiones RSDJ = Emisiones del relleno sanitario doña Juana toneladas equivalentes de CO₂.

Emisiones E.E = Emisiones de la producción de Energía Eléctrica toneladas equivalentes de CO₂.

El cálculo se efectuó multiplicando el factor de emisión propuesto por el SIN de acuerdo a las emisiones generadas por la producción de energía por el consumo eléctrico del año 2015.

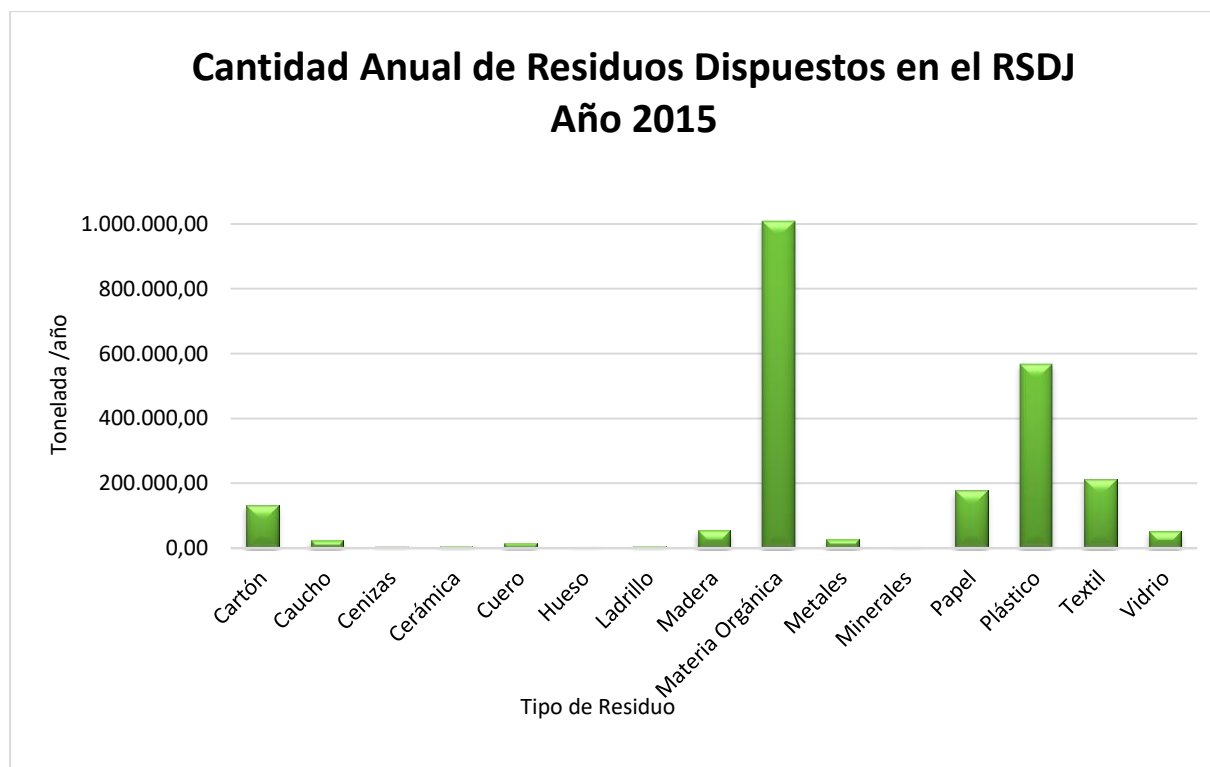
Emisiones Inc. = Emisiones de la incineración RSU por medio de una planta de incineración de lecho fluidizado rotativo.

6. Resultados y Análisis de resultados

6.1 Cantidad y residuos susceptibles al aprovechamiento energético en el RSDJ

En el año 2015 ingresaron 2.296.009,40 toneladas de residuos al RSDJ, la mayor participación fue de la materia orgánica con 1.007.813,76 tonelada/año, el plástico con 567.927,94 toneladas y textil con 213.669,13 toneladas, seguido del papel con 177.354,74 toneladas, vidrio con 52.716,33 toneladas, cartón con 132.761,90 toneladas, siendo minerales con 2.504,95 toneladas y huesos con 1.942,43 toneladas, los residuos con menor cantidad, la siguiente gráfica muestra la información descrita anteriormente. En los meses de marzo, Julio y diciembre ingresaron más de 195.000 toneladas de residuos y en el mes de febrero 181.755,21 toneladas siendo la menor cantidad de residuos dispuestos en el año 2015.

Ilustración 8. Cantidad Anual de Residuos Dispuestos año 2015.



Fuente: Elaborado por los Autores con la información de la UAESP (2017)

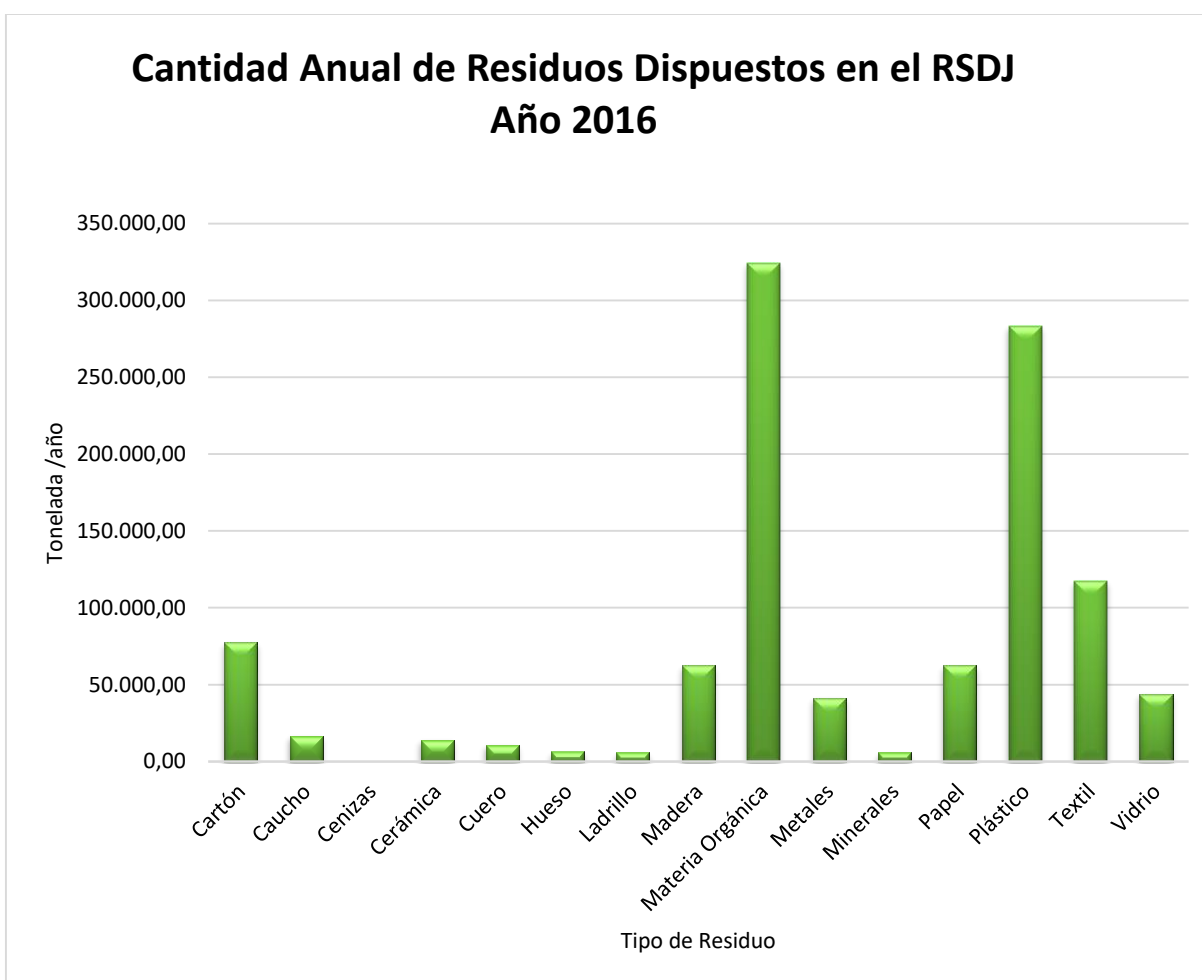
Ilustración 9. Cantidad De Residuos Sólidos Dispuestos en el RSDJ Año 2015.

Cantidad de residuos sólidos que ingresan y se disponen en el RSDJ AÑO 2015													
Tipo de Residuo	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Cantidad Total por Residuo Ton/año
	Ton/mes	Ton/mes	Ton/mes	Ton/mes	Ton/mes	Ton/mes	Ton/mes	Ton/mes	Ton/mes	Ton/mes	Ton/mes	Ton/mes	
Cartón	5.716,68	8.438,05	15.610,34	10.059,14	13.641,35	11.464,23	9.704,45	6.231,09	7.458,29	12.898,17	6.233,28	25.306,83	132.761,90
Caucho	726,53	309,82	736,34	1.583,38	429,27	1.373,81	895,79	1.655,13	3.610,38	6.189,23	5.288,84	1.290,15	24.088,70
Cenizas	0,00	1.403,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1.947,22	0,00	0,00	0,00	595,45	3.945,98
Cerámica	0,00	182,25	490,89	931,40	0,00	0,00	0,00	1.947,22	1.425,15	472,46	472,22	446,59	6.368,18
Cuero	1.663,38	1.330,41	490,89	0,00	953,94	473,73	99,53	1.947,22	4.417,97	661,44	3.352,75	1.042,05	16.433,31
Hueso	841,25	127,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	973,61	0,00	0,00	0,00	0,00	1.942,43
Ladrillo	0,00	0,00	1.423,58	1.769,66	429,27	1.326,44	0,00	730,21	475,05	0,00	0,00	0,00	6.154,22
Madera	764,77	2.186,97	4.516,20	5.867,83	5.437,46	2.652,88	3.896,71	6.328,46	10.892,91	4.015,91	6.422,17	2.133,71	55.115,98
Materia Orgánica	109.037,58	76.726,10	70.825,78	62.720,59	89.431,90	82.997,23	118.682,87	84.509,22	64.739,90	99.405,69	93.121,41	55.615,49	1.007.813,76
Metales	1.911,93	1.148,16	589,07	1.210,82	572,36	284,24	696,73	5.208,81	5.463,08	2.598,53	3.211,08	4.317,05	27.211,87
Minerales	133,84	783,66	0,00	0,00	0,00	0,00	497,66	97,36	0,00	0,00	0,00	992,42	2.504,95
Papel	14.033,59	12.629,74	18.457,51	14.297,02	12.782,80	15.490,92	14.183,42	13.776,56	14.869,08	17.528,28	14.072,10	15.233,72	177.354,74
Plástico	34.950,15	55.640,09	47.714,62	52.065,35	50.368,05	54.952,51	33.492,78	50.286,88	52.968,14	25.607,36	40.610,76	69.271,25	567.927,94
Textil	10.974,50	17.987,81	33.920,58	35.067,27	13.593,65	14.638,21	14.034,12	12.510,87	17.101,82	13.748,60	12.277,67	17.814,03	213.669,13
Vidrio	10.439,16	2.861,28	1.570,85	698,55	3.148,00	3.837,20	2.886,45	6.571,86	6.603,20	5.858,51	3.824,97	4.416,29	52.716,33
Total Ingresado (Ton)	191.193,37	181.755,21	196.346,64	186.271,02	190.788,06	189.491,40	199.070,52	194.721,71	190.024,99	188.984,20	188.887,24	198.475,05	2.296.009,40

Fuente: Elaborado por los Autores con información de la UAESP (2017)

En el año 2016 en los meses de enero a junio ingresaron 1.072.694,52 toneladas de residuos al RSDJ, donde la mayor participación fue de la materia orgánica con 324.284,95 toneladas, el plástico con 283.238,34 toneladas y textil con 117.435,10 toneladas, seguido del papel con 62.681,50 toneladas, vidrio con 44.019,85 toneladas, cartón con 77.429,32 toneladas, siendo las cenizas con 0,00 y minerales con 6.000,67 toneladas los residuos con menor cantidad dispuesta en ese periodo de tiempo, la siguiente gráfica nos muestra la información descrita anteriormente. En el mes de Mayo ingresaron 194.761,72 toneladas de residuos y en el mes de Junio ingresaron 167.455,88 toneladas, siendo la menor cantidad de residuos (Véase anexo).

Ilustración 10. Cantidad de Residuos Dispuestos en el primer semestre del año 2016.



Fuente: Elaborado por los Autores con información de la UAESP (2017)

Ilustración 11. Cantidad De Residuos Sólidos Dispuestos en el RSDJ Año 2016

Cantidad de residuos sólidos que ingresan y se disponen en el RSDJ AÑO 2016							
Tipo de Residuo	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Cantidad Total por Residuo Ton/ año
	Ton/mes	Ton/mes	Ton/mes	Ton/mes	Ton/mes	Ton/mes	
Cartón	13.271,78	9.375,26	23.452,76	12.169,74	11.876,90	7.282,87	77.429,32
Caucho	2.394,13	6.035,88	719,87	1.324,86	3.251,55	2.846,18	16.572,46
Cenizas	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cerámica	2.602,31	0,00	4.451,86	0,00	4.906,52	2.092,78	14.053,47
Cuero	1.700,18	5.178,72	2.462,73	283,90	720,40	418,56	10.764,48
Hueso	0,00	0,00	1.004,04	2.044,06	2.570,08	837,11	6.455,29
Ladrillo	4.163,70	1.482,18	0,00	435,31	0,00	0,00	6.081,19
Madera	10.149,01	10.768,16	11.233,83	10.087,83	6.522,56	13.644,93	62.406,31
Materia Orgánica	52.046,21	59.376,66	40.123,54	65.769,60	58.449,93	48.519,01	324.284,95
Metales	7.893,67	7.857,36	5.740,05	4.674,85	4.809,17	10.296,48	41.271,59
Minerales	0,00	0,00	1.041,92	4.958,74	0,00	0,00	6.000,67
Papel	10.981,75	11.393,18	12.465,20	7.986,98	11.935,31	7.919,08	62.681,50
Plástico	49.704,13	47.858,48	47.701,17	54.508,33	46.047,33	37.418,91	283.238,34
Textil	11.675,70	11.428,89	17.807,42	18.737,24	30.529,48	27.256,37	117.435,10
Vidrio	6.939,49	7.910,94	19.285,06	2.119,77	6.425,21	1.339,38	44.019,85
Otros			17.661,01	1.943,06	5.725,08	1.387,90	26.717,05
Total Ingresado (Ton)	173.522,06	178.665,71	187.489,45	185.101,20	188.044,46	159.871,65	1.072.694,52

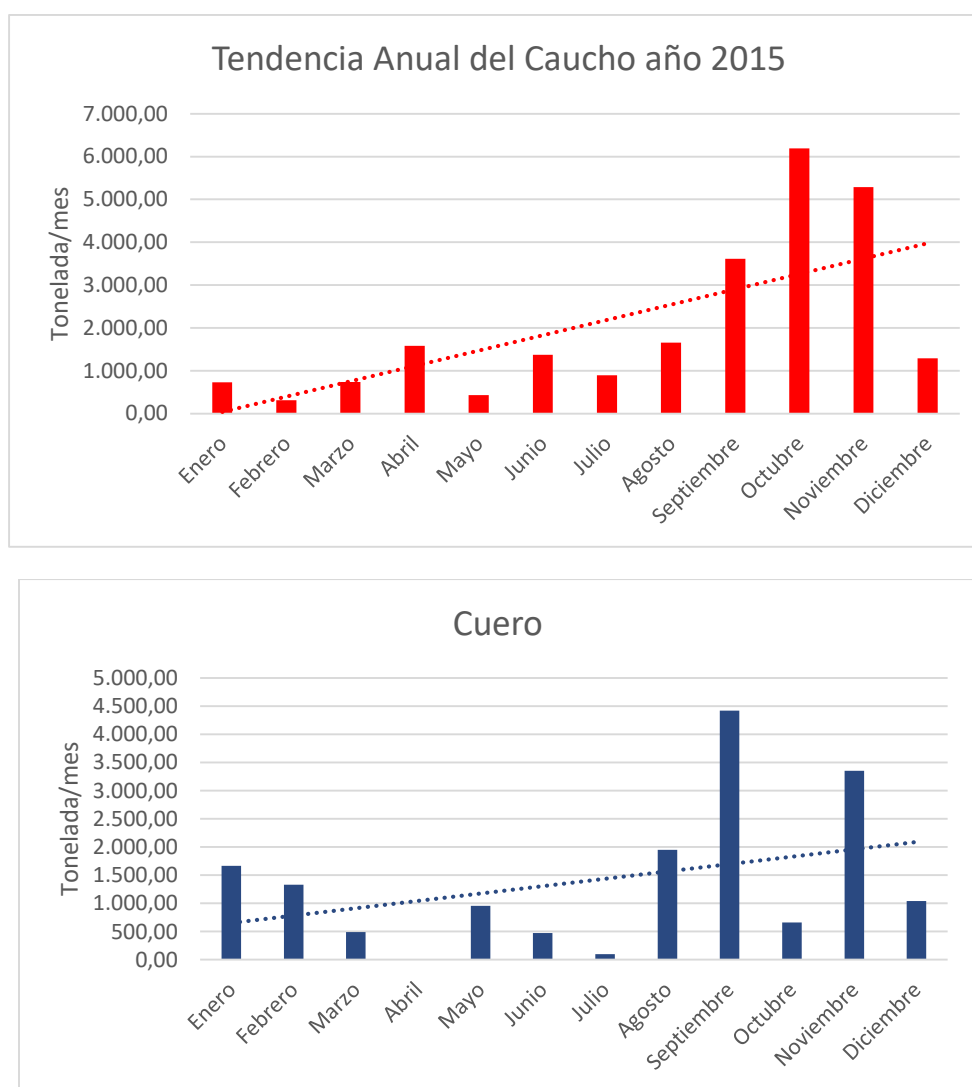
Fuente: Elaborado por los Autores con información de la UAESP (2017)

6.1.1 Tendencia De los Residuos

La tendencia mensual de los residuos que son susceptibles a aprovechamiento es determinante para comprender el comportamiento de estos, la cantidad de residuos mensual y anual es importante a la hora de estipular la cantidad de energía que se generará a partir del aprovechamiento energético de los residuos.

Para el año 2015 los residuos como la materia orgánica, vidrio, papel y plástico tuvieron una tendencia con una inapreciable variación a lo largo del año, el caucho, cuero y madera tienden a aumentar en los últimos meses del año (octubre y septiembre respectivamente), en los meses de enero y marzo se reporta el menor ingreso de estos residuos en el RSDJ (Véase anexo).

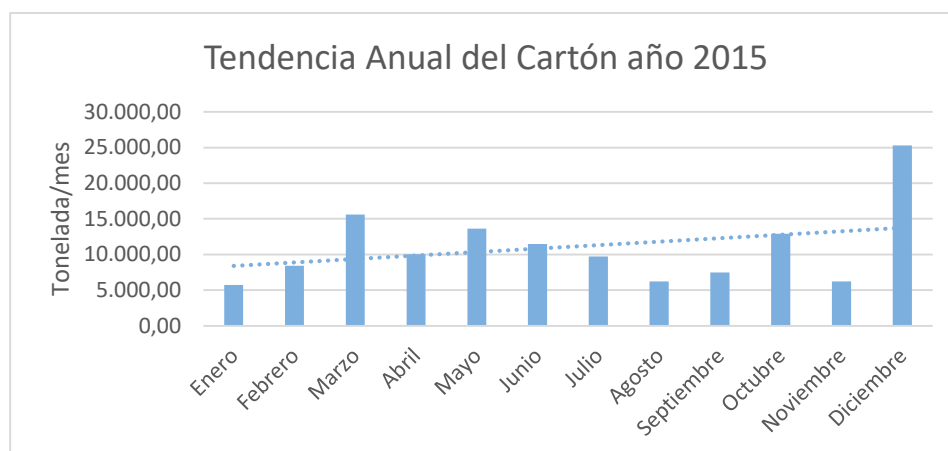
Ilustración 12. Tendencia del Caucho y Cuero año 2015



Fuente: Elaborado por los Autores con información de la UAESP (2017)

El cartón tiene un significativo incremento en el mes de diciembre, el resto de año varía considerablemente, lo contrario sucede con el textil donde ingresaron más residuos en el mes de marzo y abril, en los últimos meses se evidencia una reducción del residuo.

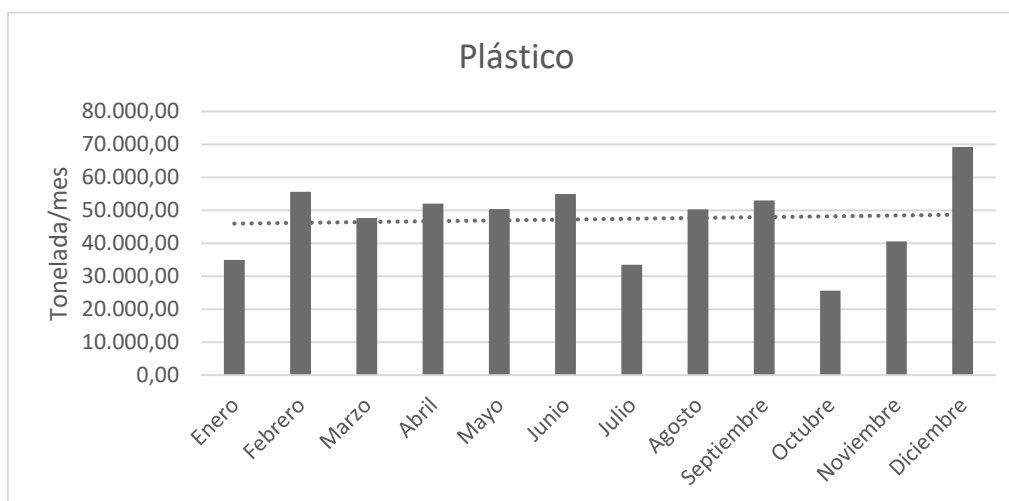
Ilustración 13. Tendencia del Cartón año 2015



Fuente: Elaborado por los Autores con información de la UAESP (2017)

El plástico es uno de los residuos con mayor poder calorífico inferior, aunque la incineración de productos derivados del petróleo implica una generación de emisiones de dióxido de carbono significativas, se debe implementar un sistema de recuperación o reciclaje para evitar el aprovechamiento térmico de la mayoría de este.

Ilustración 14. Tendencia del Plástico año 2015

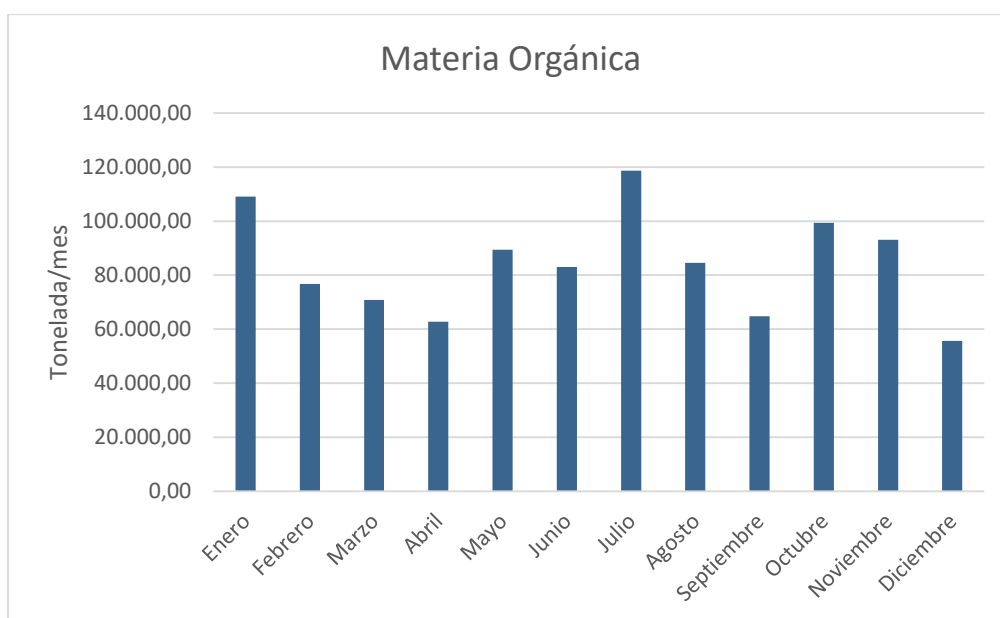


Fuente: Elaborado por los Autores con información de la UAESP (2017)

La materia orgánica es el residuo con mayor participación en la composición porcentual de los desechos dispuestos en el RSDJ, su comportamiento anual presenta picos en

los meses de enero, Junio, octubre y noviembre, por lo tanto la generación de energía más significativa se presentará en estos meses, aunque el contenido energético es inferior en comparación con el plástico o cuero. En estos meses se debe contemplar las emisiones de CO₂ y otros contaminantes en el proceso de aprovechamiento térmico dado a la composición elemental de los residuos.

Ilustración 15. Tendencia de la materia orgánica año 2015



Fuente: Elaborado por los Autores con información de la UAESP (2017)

6.1.2. Contenido de Humedad

La materia orgánica es el residuo con mayor fracción de agua contenida, dado a su composición elemental, el peso en base seca se reduce en un 70% con respecto a su peso en base húmeda, ya que su peso en base seca en el año 2015 es de 32.711,27 ton/mes y su peso en base húmeda es 109.037,58 ton/mes. Al ser sometido a un proceso térmico el residuo perderá su contenido de humedad en proporción al aumento de la temperatura.

La mayoría de residuos dispuestos llegan en estado sólido con un contenido de agua no tan significativo, algunos residuos como el papel son susceptibles a absorber agua de residuos como la materia orgánica, esta transferencia de humedad se podría evidenciar también en el cartón y textil pero en menor cantidad. Los residuos como plástico, cuero, metales resultan ser los menos afectados por esta transferencia dado a su composición elemental. En las siguientes tablas se consolidaron los pesos en base seca para el año 2015 y primer semestre del año 2016.

Ilustración 16. Peso Base Seca de Los Residuos Sólidos año 2015 (Ton/mes)

PESO RESIDUOS SÓLIDOS BASE SECA AÑO 2015												
Tipo de Residuo	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
	Ton/mes	Ton/mes	Ton/mes	Ton/mes	Ton/mes	Ton/mes	Ton/mes	Ton/mes	Ton/mes	Ton/mes	Ton/mes	Ton/mes
Cartón	5.430,85	8.016,15	14.829,82	9.556,18	12.959,28	10.891,02	9.219,22	5.919,54	7.085,38	12.253,26	5.921,61	24.041,49
Caucho	712,00	303,62	721,61	1.551,72	420,69	1.346,34	877,88	1.622,03	3.538,18	6.065,45	5.183,07	1.264,35
Cenizas	0,00	1.319,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1.830,38	0,00	0,00	0,00	559,73
Cuero	1.497,04	1.197,36	441,80	0,00	858,55	426,36	89,58	1.752,50	3.976,17	595,30	3.017,47	937,84
Madera	611,82	1.749,57	3.612,96	4.694,26	4.349,97	2.122,30	3.117,37	5.062,76	8.714,33	3.212,73	5.137,73	1.706,97
Materia Orgánica	32.711,27	23.017,83	21.247,73	18.816,18	26.829,57	24.899,17	35.604,86	25.352,77	19.421,97	29.821,71	27.936,42	16.684,65
Metales	1.854,58	1.113,71	571,40	1.174,50	555,19	275,71	675,83	5.052,54	5.299,19	2.520,58	3.114,75	4.187,54
Papel	13.191,58	11.871,95	17.350,06	13.439,19	12.015,83	14.561,47	13.332,41	12.949,97	13.976,94	16.476,59	13.227,77	14.319,70
Plástico	34.251,15	54.527,29	46.760,33	51.024,05	49.360,69	53.853,46	32.822,92	49.281,14	51.908,78	25.095,21	39.798,54	67.885,83
Textil	9.877,05	16.189,03	30.528,52	31.560,54	12.234,28	13.174,39	12.630,71	11.259,78	15.391,64	12.373,74	11.049,90	16.032,62
Vidrio	10.230,37	2.804,06	1.539,43	684,58	3.085,04	3.760,46	2.828,72	6.440,42	6.471,14	5.741,34	3.748,47	4.327,96

Fuente: Elaborado por los Autores con información de la UAESP (2017)

Ilustración 17. Peso Base Seca de Los Residuos Sólidos año 2016 (Ton/mes)

PESO RESIDUOS SÓLIDOS BASE SECA AÑO 2016						
Tipo de Residuo	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
	Ton/mes	Ton/mes	Ton/mes	Ton/mes	Ton/mes	Ton/mes
Cartón	12.608,19	8.906,50	22.280,12	11.561,25	11.283,06	6.918,73
Caucho	2.346,24	5.915,17	705,48	1.298,36	3.186,51	2.789,26
Cuero	1.666,17	5.075,14	2.413,47	278,22	705,99	410,18
Madera	9.946,03	10.552,79	11.009,16	9.886,07	6.392,11	13.372,03
Materia Orgánica	51.005,28	58.189,13	39.321,07	64.454,21	57.280,93	47.548,63
Metales	7.735,80	7.700,22	5.625,25	4.581,35	4.712,99	10.090,55
Papel	10.762,11	11.165,31	12.215,89	7.827,24	11.696,61	7.760,70
Plástico	48.710,05	46.901,31	46.747,14	53.418,16	45.126,39	36.670,53
Textil	11.442,19	11.200,31	17.451,28	18.362,49	29.918,89	26.711,24
Vidrio	6.800,70	7.752,72	2.005,04	4.136,20	6.582,92	7.432,55

Fuente: Elaborado por los Autores con información de la UAESP (2017)

6.1.3 Potencial de Generación de energía de los RSU

Los residuos como el caucho y el plástico poseen un PCI superior a 4900 kcal/kg, el potencial de generación de energía para el año 2015 en el mes de enero fue de 4.129.623,84 kWh/mes para el caucho y 264.888.765,69 kWh/mes para el plástico, la diferencia significativa se debe a la cantidad del residuo que ingresa al RSDJ, de acuerdo a la composición porcentual la participación en el mes de enero del 2015 fue para el caucho de 0.38% y para el plástico de 18,28%.

Ilustración 18. Potencial de generación de energía de los residuos sólidos base seca AÑO 2015

POTENCIAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS BASE SECA AÑO 2015												
Tipo de Residuo	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
	kWh/mes	kWh/mes	kWh/mes	kWh/mes	kWh/mes	kWh/mes	kWh/mes	kWh/mes	kWh/mes	kWh/mes	kWh/mes	kWh/mes
Cartón	20997177,75	30992667,32	57336242,82	36946871,20	50104201,12	42107725,90	35644096,81	22886599,05	27394061,82	47374545,93	22894621,54	92951139,66
Caucho	4129623,84	1761019,02	4185337,94	8999947,86	2439988,50	7808751,10	5091698,38	9407784,70	20521425,84	35179597,81	30061782,02	7333225,70
Cenizas	0,00	886973,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1230759,60	0,00	0,00	0,00	376363,71
Cuero	6828159,14	5461292,89	2015100,71	0,00	3915910,43	1944648,29	408580,51	7993296,60	18135702,08	2715220,44	13762981,67	4277583,37
Madera	3622766,85	10359764,11	21393438,61	27796180,15	25757494,59	12566811,64	18458883,23	29978182,64	51600212,61	19023568,93	30422093,95	10107497,80
Materia Orgánica	103253615,12	72656122,61	67068779,39	59393535,94	84687934,16	78594595,17	112387270,64	80026379,75	61305729,15	94132654,77	88181728,29	52665331,63
Metales	121715,23	73092,65	37500,63	77081,91	36437,16	18094,76	44354,35	331596,74	347784,16	165424,67	204420,12	274826,74
Papel	44318514,45	39885091,82	58289368,97	45150409,03	40368471,06	48920802,44	44791670,67	43506798,39	46957018,60	55354855,47	44440117,63	48108555,44
Plástico	264888765,69	421698814,04	361631279,10	394605678,77	381741731,36	416487548,81	253843284,95	381126568,79	401447962,81	194079342,31	307790776,12	525009996,85
Textil	45050153,38	73839672,42	139243459,01	143950619,04	55801723,65	60089632,22	57609851,62	51356930,64	70202717,72	56437796,28	50399651,19	73126306,19
Vidrio	332282,57	91075,76	50000,84	22235,17	100202,19	122139,64	91876,87	209184,86	210182,60	186478,72	121750,22	140572,30

Fuente: Elaborado por los Autores (2017)

La materia orgánica tiene un PCI de 833 kcal/kg y el cartón de 3333 kcal/kg, el potencial de generación de energía para el mes de enero del año 2016 fue de 48.746.807,87 kWh/mes para el cartón y 49.285.385,67 kWh/mes para la materia orgánica, el residuo con mayor generación de energía es la materia orgánica por tener mayor participación porcentual en el RSDJ con un 57,03%, el cartón posee mayor PCI sin embargo, su participación es el 2,99% por lo que su generación de energía varía mensualmente

Ilustración 19. Método 2 Potencial de generación de energía de los residuos sólidos base seca año 2015.

POTENCIAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS BASE SECA AÑO 2015												
Tipo de Residuo	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
	kWh/mes	kWh/mes	kWh/mes	kWh/mes	kWh/mes	kWh/mes	kWh/mes	kWh/mes	kWh/mes	kWh/mes	kWh/mes	kWh/mes
Cartón	20997177,75	30992667,32	57336242,82	36946871,20	50104201,12	42107725,90	35644096,81	22886599,05	27394061,82	47374545,93	22894621,54	92951139,66
Caucho	4129623,84	1761019,02	4185337,94	8999947,86	2439988,50	7808751,10	5091698,38	9407784,70	20521425,84	35179597,81	30061782,02	7333225,70
Cenizas	0,00	850770,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1180524,51	0,00	0,00	0,00	361001,92
Cuero	6270758,39	5015473,07	1850602,69	0,00	3596244,27	1785901,49	375227,00	7340782,59	16655236,60	2493569,79	12639472,96	3928392,89
Madera	2957360,69	8456950,29	17464031,52	22690759,31	21026526,20	10258621,74	15068476,10	24471985,83	42122622,54	15529444,02	24834362,41	8251018,62
Materia Orgánica	31608249,53	22241670,19	20531259,00	18181694,67	25924877,81	24059569,95	34404266,52	24497871,35	18767059,94	28816118,81	26994406,62	16122040,30
Metales	120473,24	72346,80	37117,97	76295,36	36065,35	17910,12	43901,75	328213,10	344235,35	163736,67	202334,20	272022,38
Papel	42509595,49	38257128,89	55910211,05	43307535,20	38720778,36	46924035,00	42963439,21	41731010,70	45040405,59	53095473,61	42626235,28	46144940,93
Plástico	264888765,69	421698814,04	361631279,10	394605678,77	381741731,36	416487548,81	253843284,95	381126568,79	401447962,81	194079342,31	307790776,12	525009996,85
Textil	41372589,84	67811944,06	127876646,03	132199548,10	51246480,90	55184356,12	52907006,59	47164528,14	64471883,62	51830629,24	46285393,95	67156811,81
Vidrio	332282,57	91075,76	50000,84	22235,17	100202,19	122139,64	91876,87	209184,86	210182,60	186478,72	121750,22	140572,30

Fuente: Elaborado por los Autores (2017)

Los resultados de la ecuación 5 del contenido energético de los residuos sólidos en base seca determinaron cierta variación en la producción de energía kWh por mes en los residuos con alto contenido de agua, es decir, en el cuero, la madera, materia orgánica, papel y textil, de acuerdo a este método la producción de energía disminuye en un 8%, por lo que para determinar la humedad de los residuos se deberá optar por métodos más fiables y considerar el margen de producción de energía más conservador (ver anexo 1 y 2). Sin embargo, en residuos en estado sólido como el plástico y vidrio no se evidencia un cambio significativo en la producción de energía.

6.2 Matriz de evaluación de las Tecnologías

La evaluación de las tecnologías de incineración, pirólisis y gasificación, permitió identificar las principales características de las condiciones operativas y económicas de las tecnologías. La calificación total es la suma ponderada de los criterios para cada tecnología, el valor asignado a cada uno de los criterios esta un rango de 1 a 3, donde la máxima evaluación es 3 y la mínima 1 para cada criterio.

La tecnología de incineración obtuvo una calificación total de 20, corresponde al 35%, siendo la ponderación más alta entre las tres tecnologías evaluadas. La tecnología de pirolisis y gasificación obtuvieron una calificación total de 18 y 19 puntos, es decir 32% y 33% respectivamente, la diferencia no parece tan significativa, sin embargo, al desglosar la valoración en cada criterio es más posible analizar los resultados.

Las 3 tecnologías poseen condiciones específicas respecto a los residuos que son susceptibles al aprovechamiento térmico, la incineración es la tecnología con menor restricción de los residuos a aprovechar, a diferencia de la pirolisis y gasificación que permiten el aprovechamiento de residuos específicos como el papel y cartón en la pirolisis y la madera en la gasificación. Respecto al informe o caracterización de residuos que ingresan al Relleno Sanitario Doña Juana elaborado por la UAESP, se identificó 8 tipos de residuos susceptibles a aprovechamiento térmico, por ende, la tecnología que permitiría efectuar dicho aprovechamiento es la incineración.

Los costos obtenidos para los sistemas de incineración, pirolisis y gasificación de acuerdo a las ecuaciones de CIPI y COPI se consolidan en la siguiente tabla:

Tabla 29. Costos de los Sistemas Evaluados

Costos Tecnologías de Valorización Energética			
Tecnología	Escenario	Costo de Inversión \$ Dólares	Costo de Inversión \$ COP
Incineración	Planta con capacidad de tratar 400.000 ton por año	118,000,000	362.392.160.000
	Sistema de 4 plantas para tratar los residuos del	N/A	1.946.195'336.265

Costos Tecnologías de Valorización Energética			
	RSDJ		
	Escenario	Costo por tonelada \$ Dólares por ton	Costo por tonelada \$ COP por ton
	Incineración de residuos no peligrosos valor promedio	60	173.685,59
	Incineración 220.000 toneladas mensuales del RSDJ	N/A	36.473'973.900
Tecnología	Escenario	Costo de Inversión \$ Dólares	Costo de Inversión \$ COP
PIRÓLISIS	Planta con capacidad de tratar 30.000ton por año	10.000.000	28.947.598.100
	plantas para tratar 1'800.000 ton/ año los residuos depositados en el RSDJ	N/A	1.736.855.886.000
	Escenario	Costo por tonelada \$ Dólares por ton	Costo por tonelada \$ COP por ton
	Incineración	60	173.685,59

Costos Tecnologías de Valorización Energética			
	de residuos		
	Incineración toneladas mensuales del RSDJ	N/A	32.421.310.400
Tecnología	Escenario	Costo de Inversión \$ Dólares	Costo de Inversión \$ COP
GASIFICACIÓN	Planta con capacidad de tratar ton por año	350	1'013.165,93
	plantas para tratar 156.000 TON/ AÑO residuos del RSDJ	N/A	56.737.292.080
	Escenario	Costo por tonelada \$ Dólares por ton	Costo por tonelada \$ COP por ton
	Incineración de residuos	85	246.054,58
	Incineración de 11.000 toneladas mensuales del RSDJ	N/A	2.706.600.380

La incineración no requiere pre tratamiento de los residuos, lo que reduce costos pero disminuye la eficiencia del proceso, por otro lado en las tecnologías de pirolisis y gasificación los residuos se deben someter a un pre tratamiento, aumentando los costos y la eficiencia del sistema. Los costos de implementación evaluados no tienen en cuenta costos por pre tratamiento de los residuos (los costos de implementación son

la suma de los costos de estudios previos, instalación del proyecto, compra del terreno, divididos por la cantidad de residuos requeridos para la operación diaria de la planta (Toneladas/ día) (Gobierno de Chile, 2001), en la evaluación de dicho criterio la incineración y pirólisis son sistemas relativamente económicos, dependiendo de la capacidad de tratamiento de la planta, la inflación, etc.

La incineración y gasificación reducen significativamente el volumen del residuo, es decir, el remanente del proceso, esto comparado a la cantidad de residuos que pueden ser tratados por el sistema (tonelada/día), se reduce en un 95% el volumen de los residuos. La tecnología de la incineración puede llegar a tener una vida útil de 30 años, efectuando los mantenimientos respectivos a esta, y dando buen manejo, este panorama es más favorable frente a las otras dos tecnologías que promedian una vida útil de 5 años.

El sistema de incineración se adapta a las condiciones actuales del Relleno Sanitario Doña Juana, es decir, al posible tratamiento o valorización de todos los residuos (Ton/año), de acuerdo a la información de la UAESP del año 2015 y hasta mediados del 2016, sin considerar de manera global el manejo integral de los residuos sólidos, sólo se consideró la etapa de disposición final direccionado al aprovechamiento energético de los residuos sólidos.

Sin embargo, dado a la subjetividad de la evaluación y la poca diferencia en la puntuación de las tecnologías, este documento puede dar bases a investigadores o interesados en el tema a proponer o diseñar un sistema de valorización de residuos sólidos, integrando la separación de los residuos, el papel de los recicladores o plantas de reciclaje, etc.

Tabla 30. Matriz de evaluación de las tecnologías de conversión térmica

Criterios De Evaluación													
Ítem		CONDICIONES OPERATIVAS					CONDICIONES ECONÓMICAS			CONDICIONES AMBIENTALES		Calificación Total	Ponderación
		Residuo susceptible a aprovechamiento térmico	Requiere pretratamiento	Productos	Temperatura de operación	Capacidad de tratamiento (tonelada/día)	Eficiencia	Vida útil	Costos de implementación	Porcentaje de reducción de volumen del residuo	Emisiones de Gases y partículas		
Tecnologías Termoquímicas	Incineración	3	2	1	1	3	1	3	3	2	1	20	35%
	Pirolisis	2	1	3	2	1	3	1	2	1	2	18	32%
	Gasificación	1	1	2	3	3	2	2	1	2	2	19	33%
											Σ	57	

Fuente: Elaborado por los Autores (2017)

6.3 Funcionamiento y Capacidad De La Planta Incineradora

Para establecer la capacidad de las plantas incineradoras en el escenario del RSDJ, se planteó el funcionamiento de la planta durante 6 días a la semana, para un total de 313 días de trabajo en un año, los 52 días restantes son para desarrollar actividades de mantenimiento, reparación, etc. (Romero Sánchez, 2007). La cantidad de horas que la planta estará en funcionamiento es de 7512 h/año.

Ecuación 17. Tiempo de Funcionamiento de la Planta Incineradora.

$$TF = \left(\frac{24 \text{ horas}}{1 \text{ día}} \right) \times \left(\frac{313 \text{ días}}{\text{año}} \right) = 7512 \text{ h/año}$$

Fuente: (Romero Sánchez, 2007)

La capacidad mínima de tratamiento de las plantas incineradoras se estimó con la cantidad total de residuos ingresados al RSDJ en el año 2015, se busca la incineración completa de todos los residuos susceptibles a valorización energética (11 tipos de residuos), por ende para el cálculo de la capacidad mínima de la planta se contempló el funcionamiento de la planta (Romero Sánchez, 2007).

Ecuación 18. Capacidad mínima de la Planta Incineradora.

$$C_m = 2,279,039.63 \frac{\text{ton}}{\text{año}} * \frac{1 \text{ año}}{313 \text{ día}} * \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ horas}} = 303.39 \frac{\text{ton}}{\text{h}}$$

Fuente: (Romero Sánchez, 2007)

Para cumplir con la meta de incinerar 7.281,36 ton/ día es necesario la construcción de un sistema con varias plantas incineradoras, actualmente en Singapur se tratan 7000 ton/ día con cuatro estaciones incineradoras, conforme a esto para el escenario de RSDJ si cada planta trata 1.750 ton/ día, es decir 72.92 toneladas por hora se lograría incinerar la meta propuesta. (Oliva, 2008) (INTERNATIONAL ENTERPRISE SINGAPORE, 2012)

Es importante aclarar que este análisis debe realizarse con mayor detalle en etapas más avanzadas del proyecto o en estudios posteriores, ya que el objetivo del presente no es realizar la ingeniería de detalle de la planta. Presumiblemente se requerirá más de una instalación de incineración para poder atender toda la generación de residuos que en la actualidad es dispuesta en el RSDJ.

6.3.1 Eficiencia De La Tecnología De Incineración

6.3.1.1 Eficiencia 1

En una planta de incineración de lecho fluidizado rotativo se consideran pérdidas térmicas por el calor que se disipa por medio de ceniza, se proponen las siguientes eficiencias para cada componente; la caldera tendrá una eficiencia del 80%, ya que se transfiere este porcentaje de energía al vapor en forma de calor, en el ciclo de vapor se presentan nuevas pérdidas térmicas, por lo tanto la eficiencia es de 70% y por último para este caso, la eficiencia de un turbogenerador que convertirá el 50% de la energía contenida en el vapor en electricidad (Cid Coffré, 2016).

Ecuación 19. Eficiencia Global 1

$$Ef = (0,8 * 0,7 * 0,5) * 100\%$$

$$Ef = 28\%$$

Fuente: (Cid Coffré, 2016)

6.3.1.2 Eficiencia 2

Los factores típicos de las eficiencias y las pérdidas de un sistema de tratamiento térmico son; para una caldera que trate combustibles sólidos, en este caso RSU procesados, una eficiencia típica del 72%, el generador-turbina de vapor una eficiencia típica de 29%. Para este sistema de procesamiento térmico se tienen pérdidas de calor en el generador-turbina de vapor del 6% y 5% pérdidas de calor en el sistema (Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, Tecnologías de Conversión Térmica, 1998).

Ecuación 20. Eficiencia Global 2

$$Ef = ((0,72 * 0,29) - (0,05 * 0,06)) * 100\%$$

$$Ef = 20,6\%$$

Fuente: (Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, Tecnologías de Conversión Térmica, 1998)

6.3.1.3. Eficiencia 3

Se ha reportado que las calderas de lecho fluidizado rotativo con ciertas condiciones de escape de gases pueden alcanzar una eficiencia del 90%, un 25% de la energía que se transforma en el generador de vapor se recupera como electricidad, la eficiencia eléctrica global es de 22,5% para la tecnología de incineración por lecho fluidizado rotativo (Instituto para Diversificación y Ahorro de Energía, Madrid, 2010)

Para el contexto del RSDJ se estimó la producción de energía eléctrica con una eficiencia P, es el promedio de las tres eficiencias teóricas identificadas en el apartado anterior.

Ecuación 21. Eficiencia P

$$Ef \text{ Promedio} = \frac{Eficiencia1 + Eficencia2 + Eficiencia3}{3}$$

$$Ef \text{ Promedio} = \frac{28 + 20,6 + 22,5}{3}$$

$$Ef \text{ Promedio} = 23,7\%$$

6.3.2 Generación De Energía Eléctrica

En caso de que el sistema y la tecnología adquirida proporcionen una eficiencia del 28%, la producción de energía durante el año 2015 hubiera podido oscilar entre 138 GWh/mes¹⁶ y 228 GWh/mes, siendo el mes de diciembre el de mayor generación de energía y enero el de menor. En el mes de febrero se evidencia un incremento en la producción de energía que para el mes de Julio decrece abruptamente. (Véase ilustración 22)

En el escenario con la eficiencia mínima, se produce como mínimo 101 GWh/mes, siendo el mes de enero y octubre los meses con menor producción, la mayor producción de energía se evidencia en el mes de diciembre con 167 GWh/mes, en los otros meses se observa una variación dentro de un rango de 120 a 148 GWh/mes. (Véase ilustración 23)

Para el contexto del RSDJ se trabajó con una eficiencia de 23,7%, de acuerdo con la estimación la energía obtenida en el mes de enero se presenta la menor producción de energía con 116 GWh/mes, en los otros meses la producción oscila desde 120 GWh/mes a 170 GWh/mes y en el mes de diciembre se produce 193 GWh/mes, siendo el mes más productivo del año. (Véase ilustración 24)

¹⁶ Gigavatios por hora/mes

Ilustración 20. Producción de energía para el año 2015 con una eficiencia del 28%

PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON UNA EFICIENCIA MÁXIMA 28%												
Tipo de Residuo	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
	kWh/mes	kWh/mes	kWh/mes	kWh/mes	kWh/mes	kWh/mes	kWh/mes	kWh/mes	kWh/mes	kWh/mes	kWh/mes	kWh/mes
Cartón	5879209,77	8677946,85	16054148	10345123,9	14029176,3	11790163,3	9980347,11	6408247,73	7670337,31	13264872,9	6410494,032	26026319,1
Caucho	1156294,67	493085,325	1171894,62	2519985,4	683196,78	2186450,31	1425675,55	2634179,72	5745999,235	9850287,39	8417298,966	2053303,2
Genizas	0	248352,576	0	0	0	0	0	344612,687	0	0	0	105381,838
Cuero	1911884,56	1529162,01	564228,199	0	1096454,92	544501,522	114402,542	2238123,05	5077996,582	760261,723	3853634,868	1197723,34
Madera	1014374,72	2900733,95	5990162,81	7782930,44	7212098,49	3518707,26	5168487,3	8393891,14	14448059,53	5326599,3	8518186,306	2830099,38
Materia Orgánica	28911012,2	20343714,3	18779258,2	16630190,1	23712621,6	22006486,6	31468435,8	22407386,3	17165604,16	26357143,3	24690883,92	14746292,9
Metales	34080,2641	20465,9415	10500,1758	21582,9338	10202,4052	5066,53313	12419,2181	92847,0874	97379,56598	46318,9086	57237,63297	76951,4859
Papel	12409184	11167825,7	16321023,3	12642114,5	11303171,9	13697824,7	12541667,8	12181903,5	13147965,21	15499359,5	12443232,94	13470395,5
Plástico	74168854,4	118075668	101256758	110489590	106887685	116616514	71076119,8	106715439	112405429,6	54342215,8	86181417,31	147002799
Textil	12614042,9	20675108,3	38988168,5	40306173,3	15624482,6	16825097	16130758,5	14379940,6	19656760,96	15802583	14111902,33	20475365,7
Vidrio	93039,121	25501,2128	14000,2344	6225,84629	28056,6144	34199,0986	25725,5232	58571,7607	58851,12901	52214,0425	34090,06081	39360,2428
Total kWh/mes	138191977	184157564	199150142	200743917	180587146	187225010	147944039	175855143	195474383,3	141301856	164718378,4	228023992
GWh/mes	138,191977	184,157564	199,150142	200,743917	180,587146	187,22501	147,944039	175,855143	195,4743833	141,301856	164,7183784	228,023992

Fuente: Elaborado por los Autores (2017)

Ilustración 21. Producción de energía para el año 2015 con una eficiencia del 20.6%

PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON UNA EFICIENCIA MINIMA 20.6%												
Tipo de Residuo	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
	kWh/mes	kWh/mes	kWh/mes	kWh/mes	kWh/mes	kWh/mes	kWh/mes	kWh/mes	kWh/mes	kWh/mes	kWh/mes	kWh/mes
Cartón	4325418,62	6384489,47	11811266	7611055,47	10321465,4	8674191,54	7342683,94	4714639,4	5643176,735	9759156,46	4716292,038	19147934,8
Caucho	850702,51	362769,918	862179,617	1853989,26	502637,631	1608602,73	1048889,87	1938003,65	4227413,723	7246997,15	6192727,096	1510644,49
Cenizas	0	182716,538	0	0	0	0	0	253536,477	0	0	0	77530,9236
Cuero	1406600,78	1125026,34	415110,746	0	806677,549	400597,548	84167,5846	1646619,1	3735954,628	559335,411	2835174,224	881182,174
Madera	746289,971	2134111,41	4407048,35	5726013,11	5306043,89	2588763,2	3802529,94	6175505,62	10629643,8	3918855,2	6266951,354	2082144,55
Materia Orgánica	21270244,7	14967161,3	13816168,6	12235068,4	17445714,4	16190486,6	23151777,8	16485434,2	12628980,21	19391326,9	18165436,03	10849058,3
Metales	25073,3372	15057,0855	7725,12937	15878,8727	7506,05529	3727,5208	9136,99617	68308,9286	71643,53783	34077,4828	42110,54425	56614,3075
Papel	9129613,98	8216328,92	12007610	9300984,26	8315905,04	10077685,3	9227084,16	8962400,47	9673145,831	11403100,2	9154664,233	9910362,42
Plástico	54567085,7	86869955,7	74496043,5	81288769,8	78638796,7	85796435,1	52291716,7	78512073,2	82698280,34	39980344,5	63404899,88	108152059
Textil	9280331,6	15210972,5	28684152,6	29653827,5	11495155,1	12378464,2	11867629,4	10579527,7	14461759,85	11626186	10382328,15	15064019,1
Vidrio	68450,2104	18761,6066	10300,1725	4580,44405	20641,652	25160,7654	18926,6349	43092,0811	43297,61634	38414,617	25080,54474	28957,8929
Total kWh/mes	101669811	135487351	146517605	147690167	132860543	137744114	108844543	129379141	143813296,3	103957794	121185664,1	167760508
GWh/mes	101,669811	135,487351	146,517605	147,690167	132,860543	137,744114	108,844543	129,379141	143,8132963	103,957794	121,1856641	167,760508

Fuente: Elaborado por los Autores (2017)

Ilustración 22. Producción de energía para el año 2015 con una eficiencia del 23.7%

PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON UNA EFICIENCIA PROMEDIO 23.7%												
Tipo de Residuo	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
	kWh/mes	kWh/mes	kWh/mes	kWh/mes	kWh/mes	kWh/mes	kWh/mes	kWh/mes	kWh/mes	kWh/mes	kWh/mes	kWh/mes
Cartón	4976331,13	7345262,15	13588689,5	8756408,47	11874695,7	9979531,04	8447650,94	5424123,97	6492392,652	11227767,4	5426025,305	22029420,1
Caucho	978720,849	417361,507	991925,093	2132987,64	578277,274	1850674,01	1206732,52	2229644,97	4863577,924	8337564,68	7124642,339	1737974,49
Cenizas	0	210212,716	0	0	0	0	0	291690,025	0	0	0	89198,1985
Cuero	1618273,72	1294326,42	477578,868	0	928070,772	460881,645	96833,5804	1894411,29	4298161,392	643507,244	3261826,656	1013787,26
Madera	858595,743	2455264,09	5070244,95	6587694,7	6104526,22	2978334,36	4374755,32	7104829,28	12229250,39	4508585,84	7210036,266	2395476,98
Materia Orgánica	24471106,8	17219501,1	15895300,7	14076268	20071040,4	18626919,1	26635783,1	18966252	14529457,81	22309439,2	20899069,6	12481683,6
Metales	28846,5092	17322,9576	8887,64883	18268,4118	8635,6073	4288,4584	10511,981	78588,4275	82424,84692	39205,6477	48447,5679	65133,9363
Papel	10503487,9	9452766,76	13814580,4	10700646,9	9567327,64	11594230,2	10615625,9	10311111,2	11128813,41	13119100,7	10532307,88	11401727,6
Plástico	62778637,5	99942618,9	85706613,1	93521545,9	90472790,3	98707549,1	60160858,5	90326996,8	95143167,19	45996804,1	72946413,94	124427369
Textil	10676886,4	17500002,4	33000699,8	34116296,7	13225008,5	14241242,8	13653534,8	12171592,6	16638044,1	13375757,7	11944717,33	17330934,6
Vidrio	78750,9702	21584,9551	11850,1984	5269,73418	23747,9201	28947,0942	21774,8179	49576,8118	49813,27705	44195,4574	28854,80147	33315,6341
Total kWh/mes	116969637	155876224	168566370	169915386	152854120	158472598	125224062	148848817	165455103	119601928	139422341,7	193006022
GWh/mes	116,969637	155,876224	168,56637	169,915386	152,85412	158,472598	125,224062	148,848817	165,455103	119,601928	139,4223417	193,006022

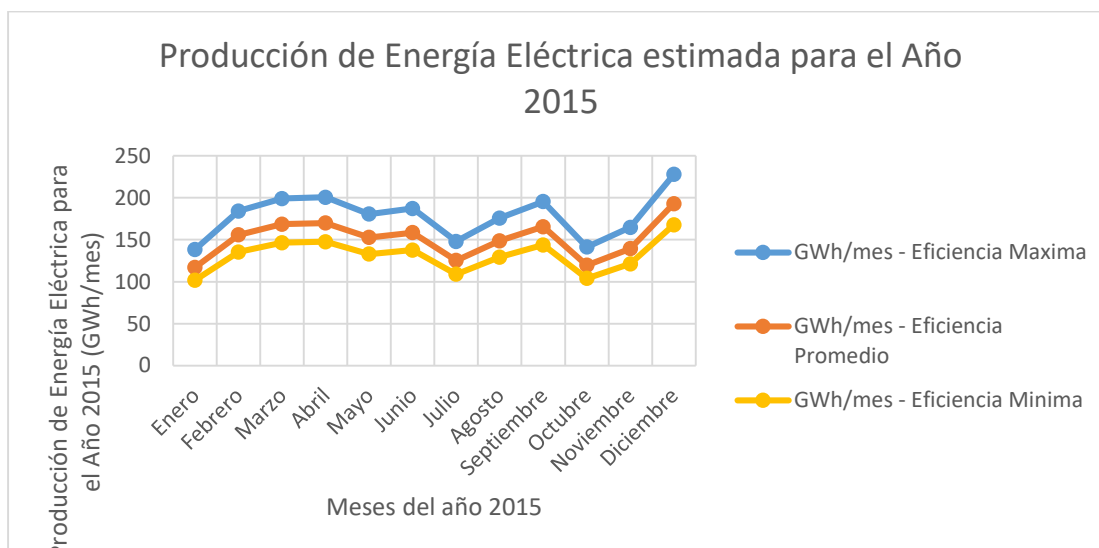
Fuente: Elaborado por los Autores (2017)

La generación de energía para el año 2015 en el RSDJ presentó un incremento a partir del mes de febrero, en el mes de mayo y Julio decrece la producción de energía, esta aumenta en septiembre asimilando los picos del inicio del año, sin embargo, en octubre se observa una significativa reducción en la producción de energía.

El mes de diciembre presenta el pico más alto y por lo tanto la mayor producción de energía, este comportamiento presenta las mismas tendencias en los tres escenarios, eficiencia máxima, mínima y promedio. La producción de energía dependió del potencial de generación de energía de los residuos sólidos y también es proporcional a la cantidad de residuos dispuestos.

El escenario con la eficiencia mínima del sistema pauta un rango de generación de energía entre los 100 a 168 GWh/mes, para la eficiencia promedio o eficiencia P tiene un rango de 116 a 193 GWh/mes, dejando el último escenario con la eficiencia máxima con un rango de 138 a 228 GWh/mes.

Ilustración 23. Gráfica de eficiencia máxima, mínima y promedio para la generación de energía eléctrica estimada para cada mes del año 2015



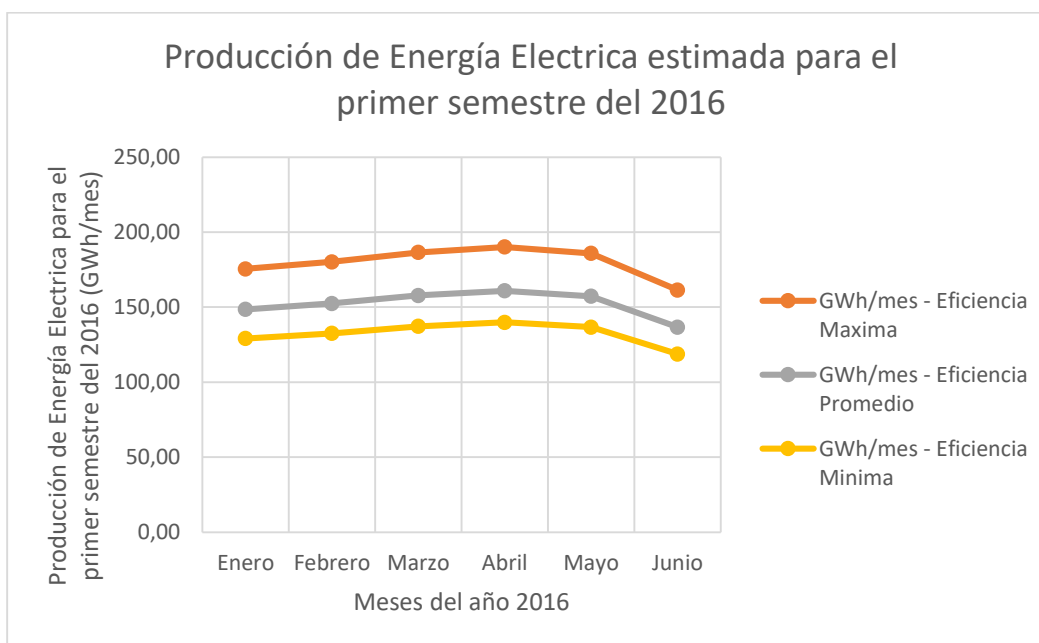
Fuente: Elaborado por los Autores (2017)

Para los meses del primer semestre del año 2016 se observó en el escenario de la eficiencia máxima una producción de energía que incrementa a partir del mes de febrero y disminuye en el mes de Junio. Se estimó una generación de energía entre los 161 GWh/mes y 190 GWh/mes, el comportamiento de estos meses es similar al del primer semestre del año 2015, sin embargo, se produce menos energía en el primer semestre del año 2016. La tendencia de febrero a mayo de la producción de energía se mantiene con pocas fluctuaciones (constante). (Véase ilustración 25).

La eficiencia de 23,7% presenta un comportamiento y tendencia similar al primer semestre del año anterior, en el mes de enero y junio se evidencia la menor producción de energía con 136 y 148 GWh/mes, en los otros meses la producción oscila desde 150 GWh/mes a 160 GWh/mes. La eficiencia mínima produciría como mínimo 118 GWh/mes, siendo el mes de julio con menor producción, la mayor producción de energía se evidencia en el mes de abril con 139 GWh/mes, en los otros meses se observa una variación dentro de un rango de 130 a 139 GWh/mes. (Véase ilustración 26)

La generación de energía estimada para el primer semestre del 2016 con los residuos dispuestos en el RSDJ presentó un comportamiento con pocas fluctuaciones o variaciones abruptas, se observó cierta constancia en los meses de febrero a junio, en enero y julio decrece la producción de energía eléctrica, este comportamiento presenta las mismas tendencias en los tres escenarios de la eficiencia máxima, mínima y promedio, la producción de energía depende del potencial de generación de energía de los residuos sólidos y también es proporcional a la cantidad de residuos dispuestos. El escenario con la eficiencia mínima del sistema pauta un rango de generación de energía entre desde los 118 a 130 GWh/mes, para la eficiencia promedio o eficiencia P tiene un rango de 136 a 163 GWh/me, dejando el ultimo escenario con la eficiencia máxima con un rango de 161 a 190 GWh/mes.

Ilustración 24. Gráfica de eficiencia máxima, mínima y promedio para la generación de energía eléctrica estimada para los meses del primer semestre del año 2016



Fuente: Elaborado por los autores (2017)

Ilustración 25. Producción de energía para el primer semestre del 2016 con una eficiencia del 28%

PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON UNA EFICIENCIA MÁXIMA 28%						
Tipo de Residuo	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
	Kwh/mes	Kwh/mes	Kwh/mes	Kwh/mes	Kwh/mes	Kwh/mes
Cartón	13649106,20	9641805,25	24119530,57	12515733,02	12214567,93	7489930,01
Caucho	3810298,72	9606228,51	1145694,86	2108533,56	5174899,34	4529753,67
Cuero	1954175,21	5952394,34	2830650,20	326310,63	828027,28	481086,49
Madera	13461371,23	14282591,70	14900250,06	13380217,83	8651347,14	18098257,74
Materia Orgánica	13799907,99	15743556,95	10638645,08	17438626,84	15497838,12	12864681,60
Metales	140704,94	140057,67	102316,58	83329,25	85723,60	183534,96
Papel	9710596,00	10074398,57	11022332,25	7062478,95	10553782,67	7002434,28
Plástico	105478760,09	101562049,82	101228206,89	115673910,34	97718553,85	79407887,41
Textil	13419999,12	13136318,54	20467778,35	21536501,58	35090453,24	31328351,90
Vidrio	61848,33	70506,31	18234,64	37616,24	59867,70	67594,58
Total kWh/mes	175486767,82	180209907,65	186473639,48	190163258,23	185875060,86	161453512,65
GWh/mes	175,49	180,21	186,47	190,16	185,88	161,45

Fuente: Elaborado por los autores (2017)

Ilustración 26. Producción de energía para el primer semestre del 2016 con una eficiencia del 20.6%

PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON UNA EFICIENCIA MINIMA 20.6%						
Tipo de Residuo	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
	Kwh/mes	Kwh/mes	Kwh/mes	Kwh/mes	Kwh/mes	Kwh/mes
Cartón	10041842,42	7093613,86	17745083,21	9208003,58	8986432,12	5510448,51
Caucho	2803291,20	7067439,54	842904,07	1551278,26	3807247,37	3332604,48
Cuero	1437714,62	4379261,55	2082549,79	240071,39	609191,50	353942,20
Madera	9903723,12	10507906,75	10962326,83	9844017,40	6364919,68	13315146,76
Materia Orgánica	10152789,45	11582759,76	7827003,16	12829846,89	11401980,90	9464730,04
Metales	103518,64	103042,43	75275,77	61306,52	63068,08	135029,29
Papel	7144224,20	7411878,95	8109287,30	5195966,66	7764568,68	5151790,94
Plástico	77602230,64	74720650,94	74475037,93	85102948,32	71892936,04	58421517,17
Textil	9873285,06	9664577,21	15058436,93	15844711,87	25816547,74	23048716,04
Vidrio	45502,70	51872,50	13415,48	27674,80	44045,52	49730,30
Total kWh/mes	129108122,04	132583003,49	137191320,47	139905825,70	136750937,64	118783655,74
GWh/mes	129,11	132,58	137,19	139,91	136,75	118,78

Fuente: Elaborado por los autores (2017)

Ilustración 27. Producción de energía para el primer semestre del 2016 con una eficiencia del 23.7%

PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON UNA EFICIENCIA PROMEDIO 23.7%						
Tipo de Residuo	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
	Kwh/mes	Kwh/mes	Kwh/mes	Kwh/mes	Kwh/mes	Kwh/mes
Cartón	11552993,46	8161099,44	20415459,81	10593674,02	10338759,29	6339690,76
Caucho	3225145,71	8130986,27	969748,86	1784723,05	4380182,66	3834112,93
Cuero	1654069,73	5038276,63	2395943,20	276198,64	700865,94	407205,35
Madera	11394089,22	12089193,69	12611997,37	11325398,66	7322747,40	15318882,44
Materia Orgánica	11680636,40	13325796,42	9004853,15	14760552,00	13117812,98	10889034,07
Metales	119096,68	118548,82	86603,68	70532,26	72558,91	155349,23
Papel	8219325,90	8527258,79	9329616,94	5977883,97	8933023,19	5927060,45
Plástico	89280236,22	85965020,74	85682446,55	97909702,68	82711775,93	67213104,70
Textil	11359070,68	11118955,33	17324512,39	18229110,26	29701562,21	26517212,15
Vidrio	52350,19	59678,55	15434,32	31839,46	50673,73	57213,99
Total kWh/mes	148537014,19	152534814,69	157836616,27	160959615,00	157329962,23	136658866,07
GWh/mes	148,54	152,53	157,84	160,96	157,33	136,66

Fuente: Elaborado por los autores (2017)

6.3.4 Porcentaje de contribución a nivel Nacional y Bogotá

La energía obtenida por la valorización de los residuos sólidos depositados en el Relleno Sanitario de Doña Juana se puede inyectar en su totalidad al sistema de energía eléctrica, este apartado estipuló el porcentaje de contribución al sistema nacional y nivel de local, este último se refiere a la ciudad de Bogotá donde se encuentra ubicado el relleno sanitario.

El Sistema de Información Minero Energético Colombiano SIMEC, junto al Sistema de Información Eléctrico Colombiano SIEL, son portales de información pública, por medio de ellos se recopiló los indicadores de oferta a nivel nacional. Para el año 2015 la oferta eléctrica anual fue de 66.548,474 GWh, durante el año la oferta eléctrica no presentó cambios significativos, el mes con mayor oferta eléctrica fue octubre y febrero el de menor oferta. Para el primer semestre del año 2016 la oferta eléctrica fue de 32.644,965 GWh/mes, se apreció un incremento en los primeros meses respecto al año anterior, específicamente en el mes de enero y febrero.

Tabla 31. Indicadores Oferta Eléctrica Mensual En El Año 2015 Para Colombia

OFERTA ELÉCTRICA 2015	
Mes	Generación (GWh)
Enero	5.392,535
Febrero	5.101,260
Marzo	5.658,723
Abril	5.322,832
Mayo	5.639,169
Junio	5.412,225
Julio	5.673,305
Agosto	5.720,923
Septiembre	5.726,689
Octubre	5.758,226
Noviembre	5.438,712
Diciembre	5.703,875
Total Anual (GWh)	66.548,474

Fuente: (SIEL-Sistema de Información Eléctrico Colombiano, 2017)

Tabla 32. Indicadores Oferta Eléctrica Mensual En El primer semestre del año 2016
Para Colombia

OFERTA ELÉCTRICA PRIMER SEMESTRE 2016	
Mes	Generación (GWh)
Enero	5.593,36
Febrero	5.466,22
Marzo	5.420,47
Abril	5.324,56
Mayo	5.482,57
Junio	5.357,80
Total Semestre (GWh)	32.644,965

Fuente: (SIEL-Sistema de Información Eléctrico Colombiano, 2017)

Se identificó el consumo de Bogotá D.C, con base a la información del reporte comercial a nivel municipal del año 2015 y primer semestre del año 2016, allí se indica el consumo residencial como la sumatoria del uso de energía en los diferentes estratos de la ciudad y el consumo no residencial hace referencia a las industrias, comercio, oficinas.

El consumo eléctrico total para la ciudad de Bogotá en el año 2015 fue de 9.400,5944 GWh, del cual 5.593,8529 GWh correspondió al consumo no residencial y 3.806,7415 GWh al consumo residencial, dado a la dinámica económica de la ciudad y el desarrollo de actividades productivas se observó mayor consumo por este sector productivo.

Tabla 33. Reporte Del Consumo Eléctrico Mensual Para Bogotá D.C En El Año 2015 -
Total Residencial + Total No Residencial

CONSUMO ELÉCTRICO 2015			
Mes	Total Residencial (GWh)	Total NO Residencial (GWh)	Consumo Total (GWh)
Enero	304,2457	431,9181	736,1638
Febrero	300,1957	435,6454	735,8411
Marzo	305,5070	454,1047	759,6117
Abril	325,8498	472,7323	798,5821

CONSUMO ELÉCTRICO 2015			
Mes	Total Residencial (GWh)	Total NO Residencial (GWh)	Consumo Total (GWh)
Mayo	306,6518	459,9785	766,6303
Junio	326,3166	479,8537	806,1703
Julio	323,6891	473,1020	796,7911
Agosto	323,4718	474,8173	798,2891
Septiembre	314,0883	471,9813	786,0697
Octubre	333,2931	493,3656	826,6588
Noviembre	322,6580	479,0474	801,7053
Diciembre	320,7746	467,3067	788,0813
Total Anual (GWh)	3.806,7415	5.593,8529	9.400,5944

Fuente: (Sistema Unico de Información de Servicios Públicos - SUI, 2017)

El mes de octubre presentó el mayor consumo a nivel residencial y no residencial, con un consumo total de 826,6588 GWh, el consumo residencial varía en un rango de 300,1 GWh y 334 GWh, el consumo no residencial al ser más alto varía entre los 431,1 GWh y los 494 GWh.

El consumo eléctrico total fue de 4.519,1058 GWh en el primer semestre del año 2016, el consumo no residencial y residencial presentan el mismo comportamiento del año 2015 por la dinámica económica que maneja la ciudad de Bogotá.

El consumo no residencial para el primer semestre del año 2016 fue de 2.675,8464 GWh, se observó un comportamiento de consumo con menores fluctuaciones y más estable.

En el mes de mayo se presentó el menor consumo eléctrico con 438,6028 GWh y marzo fue el mes con mayor consumo con 449,3222 GWh. El consumo total residencial para el primer semestre del año 2016 fue de 1.843,2593 GWh, siendo el mes de enero con mayor consumo eléctrico con 326,2651 GWh y los meses de marzo y mayo con el menor consumo. Los consumos no variaron significativamente durante el primer semestre del año 2016.

Tabla 34. Reporte Del Consumo Eléctrico Mensual Para Bogotá D.C En El primer semestre del año 2016 - Total Residencial + Total No Residencial

CONSUMO ELÉCTRICO PRIMER SEMESTRE 2016			
Mes	Total Residencial (GWh)	Total NO Residencial (GWh)	Consumo Total (GWh)
Enero	326,2651	445,2082	771,4733
Febrero	301,2005	445,7594	746,9600
Marzo	297,9571	449,3222	747,2793
Abril	309,5985	448,5755	758,1740
Mayo	297,8455	438,6028	736,4483
Junio	310,3926	448,3782	758,7709
Total Semestre(GWh)	1.843,2593	2.675,8464	4.519,1058

Fuente: (Sistema Unico de Información de Servicios Públicos - SUI, 2017)

La contribución anual de la energía generada en el Relleno Sanitario Doña Juana a partir de la valorización energética de los residuos sólidos por la tecnología de incineración (lecho fluidizado rotativo) para el año 2015 es de 2,73% frente a la oferta eléctrica nacional y corresponde al 19,30% del consumo eléctrico de la ciudad de Bogotá. La contribución a nivel nacional es reveladora frente al escenario esperado, aporta un porcentaje mayor al 1% de la oferta nacional, demuestra un panorama favorable para la inclusión de los procesos térmicos y de recuperación energética en el sistema eléctrico nacional, sin embargo, este porcentaje resulta ser sumamente teórico y puede variar de acuerdo a las condiciones del combustible, en este caso de los residuos sólidos urbanos.

La contribución local frente al consumo total de la ciudad de Bogotá es del 19,30%, representa un porcentaje considerable respecto al consumo eléctrico de la ciudad, resulta ser un servicio o agregado que sin duda contribuiría al sistema eléctrico de la ciudad, desde esta perspectiva la valorización energética significa un sistema de disposición final que contribuye al desarrollo en materia energético, económico y ambiental de las ciudades. Las contribuciones anuales oscilan en un rango a nivel nacional del 2% al 3% y para el contexto local del 15% al 24%. En el primer semestre del año 2016, se evidenció una contribución más estable con menos fluctuaciones.

Tabla 35. Porcentaje de contribución de energía eléctrica producida por los RSU respecto al consumo de energía eléctrica de Bogotá y la oferta de energía eléctrica de Colombia mensual y anual para el año 201

PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON UNA EFICIENCIA PROMEDIO 23.7%													
Tipo de Residuo	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total Anual
	Kwh/mes	Kwh/mes	Kwh/mes	Kwh/mes	Kwh/mes	Kwh/mes	Kwh/mes	Kwh/mes	Kwh/mes	Kwh/mes	Kwh/mes	Kwh/mes	Kwh/mes
Cartón	4976331.1	7345262.2	13588690	8756408.5	11874696	9979531	8447650.9	5424124	6492392.65	11227767	5426025.31	22029420	115568298.4
Caucho	978720.85	417361.51	991925.09	2132987.6	578277.27	1850674	1206732.5	2229645	4863577.92	8337564.7	7124642.34	1737974.5	32450083.3
Cenizas	0	210212.72	0	0	0	0	0	291690.02	0	0	0	89198.199	591100.939
Cuero	1618273.7	1294326.4	477578.87	0	928070.77	460881.65	96833.58	1894411.3	4298161.39	643507.24	3261826.66	1013787.3	15987658.84
Madera	858595.74	2455264.1	5070245	6587694.7	6104526.2	2978334.4	4374755.3	7104829.3	12229250.4	4508585.8	7210036.27	2395477	61877594.14
Materia Orgánica	24471107	17219501	15895301	14076268	20071040	18626919	26635783	18966252	14529457.8	22309439	20899069.6	12481684	226181821.4
Metales	28846.509	17322.958	8887.6488	18268.412	8635.6073	4288.4584	10511.981	78588.428	82424.8469	39205.648	48447.5679	65133.936	410562.0006
Papel	10503488	9452766.8	13814580	10700647	9567327.6	11594230	10615626	10311111	11128813.4	13119101	10532307.9	11401728	132741726.7
Plástico	62778637	99942619	85706613	93521546	90472790	98707549	60160859	90326997	95143167.2	45996804	72946413.9	124427369	1020131365
Textil	10676886	17500002	33000700	34116297	13225009	14241243	13653535	12171593	16638044.1	13375758	11944717.3	17330935	207874717.7
Vidrio	78750.97	21584.955	11850.198	5269.7342	23747.92	28947.094	21774.818	49576.812	49813.2771	44195.457	28854.8015	33315.634	397681.6718
Total kWh/mes	116969637	155876224	168566370	169915386	152854120	158472598	125224062	148848817	165455103	119601928	139422342	193006022	1814212610
GWh/mes	116.96964	155.87622	168.56637	169.91539	152.85412	158.4726	125.22406	148.84882	165.455103	119.60193	139.422342	193.00602	1814.21261
Bogotá	15.89%	21.18%	22.19%	21.28%	19.94%	19.66%	15.72%	18.65%	21.05%	14.47%	17.39%	24.49%	19.30%
Colombia	2.17%	3.06%	2.98%	3.19%	2.71%	2.93%	2.21%	2.60%	2.89%	2.08%	2.56%	3.38%	2.73%

Fuente: Elaborado por los Autores (2017)

Tabla 36. Porcentaje de contribución de energía eléctrica producida por los RSU respecto al consumo de energía eléctrica de Bogotá y la oferta de energía eléctrica de Colombia mensual y total para el primer semestre del 2016

PRODUCCION DE ENERGIA ELECTRICA CON UNA EFICIENCIA PROMEDIO 23.7%							
Tipo de Residuo	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Total Semestre
	Kwh/mes	Kwh/mes	Kwh/mes	Kwh/mes	Kwh/mes	Kwh/mes	Kwh/mes
Cartón	11552993,46	8161099,44	20415459,81	10593674,02	10338759,29	6339690,76	67401676,78
Caucho	3225145,71	8130986,27	969748,86	1784723,05	4380182,66	3834112,93	22324899,47
Cuero	1654069,73	5038276,63	2395943,20	276198,64	700865,94	407205,35	10472559,5
Madera	11394089,22	12089193,69	12611997,37	11325398,66	7322747,40	15318882,44	70062308,78
Materia Orgánica	11680636,40	13325796,42	9004853,15	14760552,00	13117812,98	10889034,07	72778685,03
Metales	119096,68	118548,82	86603,68	70532,26	72558,91	155349,23	622689,5751
Papel	8219325,90	8527258,79	9329616,94	5977883,97	8933023,19	5927060,45	46914169,24
Plástico	89280236,22	85965020,74	85682446,55	97909702,68	82711775,93	67213104,70	508762286,8
Textil	11359070,68	11118955,33	17324512,39	18229110,26	29701562,21	26517212,15	114250423
Vidrio	52350,19	59678,55	15434,32	31839,46	50673,73	57213,99	267190,2378
Total kWh/mes	148537014,19	152534814,69	157836616,27	160959615,00	157329962,23	136658866,07	913856888,5
GWh/mes	148,54	152,53	157,84	160,96	157,33	136,66	913,8568885
Consumo Bogotá	19,25%	20,42%	21,12%	21,23%	21,36%	18,01%	20,22%
Oferta Colombia	2,66%	2,79%	2,91%	3,02%	2,87%	2,55%	2,80%

Fuente: Elaborado por los autores (2017)

6.4 Estimación de la Reducción de Emisiones De Gases De Efecto Invernadero Del Relleno Sanitario Doña Juana Respecto Al Sistema De Incineración De Lecho Fluidizado Rotativo

6.4 Estimación de emisiones del Relleno Sanitario Doña Juana

Las emisiones que se producen actualmente en el relleno sanitario son producto de la cantidad de residuos depositados en años pasados y la generación de metano es fruto del proceso de descomposición de estos (IPCC, 2006).

La estimación de metano en el Relleno Sanitario Doña Juana se realizó con la premisa de que los residuos del año 2015 se descompondrán y emitirán metano en el mismo año, ya que no se cuenta con información de los residuos dispuestos desde el inicio del funcionamiento del relleno sanitario.

1. Masa de los desechos depositados (W): La cantidad total de residuos dispuestos en el año 2015 fue de 2296,01 Gg/mes, la mayor participación obedece a la materia orgánica.

Ilustración 28. Composición y cantidad (Gg/mes) de residuos sólidos urbanos depositados en el Relleno Sanitario Doña Juana en el año 2015.

Tipo de Residuo	Enero Gg/mes	Febrero Gg/mes	Marzo Gg/mes	Abril Gg/mes	Mayo Gg/mes	Junio Gg/mes	Julio Gg/mes	Agosto Gg/mes	Septiembre Gg/mes	Octubre Gg/mes	Noviembre Gg/mes	Diciembre Gg/mes	Total Gg/mes
Cartón	5,72	8,44	15,61	10,06	13,64	11,46	9,70	6,23	7,46	12,90	6,23	25,31	132,76
Caucho	0,73	0,31	0,74	1,58	0,43	1,37	0,90	1,66	3,61	6,19	5,29	1,29	24,09
Cenizas	0,00	1,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,95	0,00	0,00	0,00	0,60	3,95
Cerámica	0,00	0,18	0,49	0,93	0,00	0,00	0,00	1,95	1,43	0,47	0,47	0,45	6,37
Cuero	1,66	1,33	0,49	0,00	0,95	0,47	0,10	1,95	4,42	0,66	3,35	1,04	16,43
Hueso	0,84	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,97	0,00	0,00	0,00	0,00	1,94
Ladrillo	0,00	0,00	1,42	1,77	0,43	1,33	0,00	0,73	0,48	0,00	0,00	0,00	6,15
Madera	0,76	2,19	4,52	5,87	5,44	2,65	3,90	6,33	10,89	4,02	6,42	2,13	55,12
Materia Orgánica	109,04	76,73	70,83	62,72	89,43	83,00	118,68	84,51	64,74	99,41	93,12	55,62	1007,81
Metales	1,91	1,15	0,59	1,21	0,57	0,28	0,70	5,21	5,46	2,60	3,21	4,32	27,21
Minerales	0,13	0,78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,10	0,00	0,00	0,00	0,99	2,50
Papel	14,03	12,63	18,46	14,30	12,78	15,49	14,18	13,78	14,87	17,53	14,07	15,23	177,35
Plástico	34,95	55,64	47,71	52,07	50,37	54,95	33,49	50,29	52,97	25,61	40,61	69,27	567,93
Textil	10,97	17,99	33,92	35,07	13,59	14,64	14,03	12,51	17,10	13,75	12,28	17,81	213,67
Vidrio	10,44	2,86	1,57	0,70	3,15	3,84	2,89	6,57	6,60	5,86	3,82	4,42	52,72
Total Ingresado (Gg)	191,19	181,76	196,35	186,27	190,79	189,49	199,07	194,72	190,02	188,98	188,89	198,48	2296,01

Fuente: Elaborado por los Autores (2016)

Los valores de W_i corresponden a la sumatoria de los datos mensuales por cada tipo de residuo para un total anual en Gigagramos, respecto a la composición de los residuos sólidos que se depositaron en el año 2015 en el relleno sanitario doña Juana.

Tabla 37. Fracción de tipo de desecho i por categoría de desecho – 2015

Wi	
Tipo de Residuo	Total en Gg/ año
Cartón	132,76
Caucho	24,09
Cenizas	3,95
Cerámica	6,37
Cuero	16,43
Hueso	1,94
Ladrillo	6,15
Madera	55,12
Materia Orgánica	1007,81
Metales	27,21
Minerales	2,50
Papel	177,35
Plástico	567,93
Textil	213,67
Vidrio	52,72
Total	2296

Fuente: Elaborado por los Autores (2017)

2. Fracción de carbono orgánico degradable:

Tabla 38. Fracción de carbono orgánico degradable en los desechos brutos, Gg de C/Gg de desechos

Carbono Orgánico Degradable DOC (Gg C/Gg de desechos)	
Total año 2015	$\Sigma \text{DOC} * W_i$
	366,29

Fuente: Elaborado por los Autores (2017)

3 Fracción del carbono orgánico degradable que se descompone (DOC_f)

“Esto hace referencia a que una porción del carbono orgánico degradable no se degrada o su degradación es demasiado lenta, respecto a condiciones anaeróbicas en los SEDS. El DOC_f por defecto es de 0,5 (suponiendo un medio anaeróbico y que los valores del DOC incluyen la lignina) (IPCC, 2006).

4 Factor de corrección para el metano (MCF)

El SEDS o RSDJ es un sistema anaerobio gestionados, el MCF es igual a 1.

Con los valores asignados a cada variable de la ecuación 14 (COD disuelto a partir de los datos sobre eliminación de desechos), se diseñó la siguiente tabla y se halló el resultado de masa del DDOC depositado para el año 2015 en el RSDJ.

Tabla 39. Masa del DDOC depositado para los meses del año 2015

Año	DOC (Gg C/Gg de desechos)	W (Gg)	DOC_f	MCF	DDOC_m (Gg)
2015	366,29	2296,01	0,5	1	420507,385

Fuente: Elaborado por los Autores con información del (IPCC, 2006) (2017)

El resultado muestra un valor alto de carbono orgánico degradado en el año 2015 de los residuos en condiciones anaerobias, este resultado tiene relación la cantidad de materia orgánica que se dispuso en el año 2015, sumado a las condiciones que se presentan en el RSDJ y a la interacción de microorganismo en el proceso.

Fracción de CH₄ en el gas de vertedero generado (F)

Generalmente en los SEDS los residuos alcanzan a producir un gas con aproximadamente un 50% de metano, pero los elementos que se componen mayoritariamente de grasas o aceites logran producir un gas con más del 50% de metano, por lo que el valor por defecto que propone usar el IPCC para el F es de (0,5).

Al tener los variables correspondientes a la ecuación número 10 (transformación de DDOC_m en L_o), se calculó el potencial de generación de CH₄ en Gg de CH₄, los resultados de potencial de generación de metano mensual para el año 2015 se presentan en la tabla número 40.

Tabla 40. Potencial de generación de CH₄, Gg de CH₄ y su equivalente en Toneladas de CO₂ para el año 2015

				Potencial de calentamiento global del CH ₄ (GWP 100-Year)	
				28	
DDOC _m (Gg)	F	16/12	Lo (Gg de CH ₄)	Ton de CH ₄	Ton equivalentes de CO ₂
420.507,39	0,5	1,3	280.338,26	280'338.256,68	7.849'471.187,18

Fuente: Elaborado por los autores (2017)

El metano producido en el RSDJ para el año 2015 es considerable en términos de participación de emisiones, esta cantidad se determinó por el contenido de materia orgánica degradable de los residuos, cómo se evidenció al relleno sanitario llegan grandes cantidades de materia orgánica como restos de alimento, frutas, verduras, con un alto contenido de fracción orgánica degradable que sumado al contenido de humedad que estos poseen, generan grandes cantidades de metano.

La estimación de potencial de metano se realizó basándose en que los desechos se degradan en un año (2015), en el Relleno Sanitario Doña Juana se estimó una producción de 280.338.257 toneladas de metano equivalentes a 7.849'471.187 toneladas de CO₂.

Como se mencionó anteriormente la cantidad de generación de gas metano depende de los procesos de descomposición de dichos residuos y estos procesos están

determinados por factores internos y externos al SEDS, como lo son las condiciones climáticas y meteorológicas en el sitio de disposición, las propiedades fisicoquímicas de los residuos, la tecnología que se usa a la hora de disponer los RSU y la edad del relleno. Los cambios del DOC en el relleno son causados por las condiciones climáticas y meteorológicas, como la precipitación, la temperatura y el viento (Kiss & Encarnación Aguilar, 2006).

La precipitación implica una mayor producción de lixiviados, mientras que la temperatura y el viento se asocian con condicionantes para los eventos de lluvia, la temperatura tiene un efecto solo en las capas superficiales del relleno, en las capas inferiores la descomposición se ve afectada por los procesos bioquímicos, aunque los eventos de precipitación favorecen los bioprocesos (Kiss & Encarnación Aguilar, 2006).

6.5 Estimación de emisiones del Sistema de Incineración

6.5.1 Estimación de emisiones de CO_2

El cálculo de emisiones de CO_2 reemplazando los datos correspondientes en la ecuación 13 determinó que la estimación de emisiones de CO_2 para el año 2015 generadas por la incineración con recuperación de energía es de 3.779'024.663,46 Ton CO_2 e/ año .

$$ECO_2 = 2296 \times \sum(0,55 + 2,71 + 0 + 0 + 1,85 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0,73 + 452,95 + 17,09 + 0) \times \frac{44}{12}$$

$$ECO_2 = 2296 \times 448,88 \times \frac{44}{12}$$

$$ECO_2 = 3'779.024,663 \text{ Gg/año}$$

Tabla 41. Estimación de emisiones CO_2

Emisiones CO_2 Gg/año	Emisiones CO_2 Ton /año
3'779.024,663	3.779'024.663,46

Fuente: Elaborado por los Autores (2017)

El plástico es el residuo más susceptible para generar emisiones de este tipo, es un producto que proviene de los recursos fósiles y su fracción de carbono fósil es alta, al ser incinerado se libera a la atmósfera. Los países desarrollados han optado por

sistemas de reciclaje y otras alternativas de recuperación de este residuo, restringiendo su aprovechamiento energético por su aporte en las emisiones de CO_2 .

6.5.2 Estimación de emisiones de CH_4

$$Emisiones\ de\ CH_4 = \sum_i (IW_i \times EF_i) \times 10^{-6}$$

$$Emisiones\ de\ CH_4 = \sum_i (2296,01 \times 0) \times 10^{-6}$$

$$Emisiones\ de\ CH_4 = 0$$

Al reemplazar las variables en la ecuación se obtuvo que la generación de emisiones de CH_4 es cero, ya que un óptimo sistema de incineración de lecho fluidizado rotativo inyecta aire respecto a la cantidad de residuos, las temperaturas de funcionamiento permiten la combustión completa de los residuos, sin embargo, se debe considerar que esto depende de las condiciones operativas de la planta.

Tabla 42. Estimación de emisiones de CH_4 y su equivalente en Toneladas de CO_2 para el año 2015

			Potencial de calentamiento global del CH_4 (GWP 100-Year)			28
Tipo de Residuo	Total Gg/año por Residuo	EFi kg. De CH_4 /Gg de desechos	Factor De conversión de Kg en Gg	EMISIONES Gg/año de CH_4	EMISIONES Ton/año de CH_4	Ton equivalentes de CO_2
Cartón	132,76	0	0,000001	0	0	0
Caucho	24,09					
Cenizas	3,95					
Cerámica	6,37					
Cuero	16,43					
Hueso	1,94					
Ladrillo	6,15					
Madera	55,12					
Materia Orgánica	1007,81					
Metales	27,21					
Minerales	2,50					
Papel	177,35					
Plástico	567,93					

			Potencial de calentamiento global del CH4 (GWP 100-Year)		28	
Tipo de Residuo	Total Gg/año por Residuo	EFi kg. De CH4/Gg de desechos	Factor De conversión de Kg en Gg	EMISIONES Gg/año de CH4	EMISIONES Ton/año de CH4	Ton equivalentes de CO2
Textil	213,67					
Vidrio	52,72					
lwi	2296,01					

Fuente: Elaborado por los Autores (2017)

6.5.3 Estimación de emisiones de N_2O

Las emisiones de N_2O del proceso de incineración de los residuos dispuestos en el año 2015 son de 0,11480047 Gg/año.

$$\text{Emisiones de } N_2O = 2.296,10 \frac{\text{Gg de DSM}}{\text{año}} \times 50 \frac{\text{Kg de } N_2O}{\text{Gg de DSM}} \times 10^{-6}$$

$$\text{Emisiones de } N_2O = 0,11480047 \frac{\text{Gg de } N_2O}{\text{año}}$$

Tabla 43. Estimación de emisiones de N_2O y su equivalente en Toneladas de CO_2 para el año 2015

		EFi			Potencial de calentamiento global del N_2O (GWP 100-Year)		265						
Tipo de Residuo	Total Gg/año por Residuo	g de N_2O /tonelada de DSM incinerados	kg de N_2O /Gg de DSM incinerados	Factor De conversión de Kg en Gg	EMISIONES N_2O Gg /año	EMISIONES N_2O Ton /año	Ton equivalentes de CO_2						
Cartón	132,76	50	50	0,000001	0,11480047	114,8004702	30422,1246						
Caucho	24,09												
Cenizas	3,95												
Cerámica	6,37												
Cuero	16,43												
Hueso	1,94												
Ladrillo	6,15												
Madera	55,12												
Materia Orgánica	1007,81												
Metales	27,21												
Minerales	2,50												
Papel	177,35												
Plástico	567,93												
Textil	213,67												
Vidrio	52,72												
lwi	2296,01												

Fuente: Elaborado por los Autores (2017)

6.5.4 Reducción de emisiones

Emisiones RSDJ

Las emisiones de metano estimadas para el año 2015 en el relleno sanitario doña Juana son de 280.338.256,68 ton de CH₄, equivalentes a 7.849.471.187,18 ton de CO₂.

Emisiones E.E

La emisión asociada a la producción de energía eléctrica se halló al multiplicar el factor de emisión del SIN¹⁷ (0,401 ton CO₂/ MWh) por la producción de energía eléctrica del año 2015 para la oferta eléctrica nacional Colombia (UPME & Herrera Flórez , 2015). Se efectuó el cálculo para el consumo de la ciudad de Bogotá, en la siguiente tabla se consolidan las emisiones de E.E.

Tabla 44. Emisiones de E.E para Colombia y Bogotá en el año 2015

Factor de Conversión				
1	MWh	=	0,001	GWh
Factor de Emisión del SIN en ton CO₂/MWh	0,401		Factor de Emisión del SIN en ton CO₂/GWh	401
ENERGÍA ELECTRICA GENERADA POR VALORIZACIÓN ENERGÉTICA AÑO 2015				
Total Anual (GWh)			1814,21264	
Emisiones de E.E (ton de CO₂) para Bogotá				
727.499,256				

Fuente: Elaborado por los Autores (2017)

Emisiones Incineración

Las emisiones estimadas para la incineración de lecho fluidizado rotativo correspondientes a CO₂, CH₄ y N₂O se presentan en la tabla 45 con valor total equivalente a ton de CO₂.

¹⁷ Sistema Interconectado Nacional

Tabla 45. Emisiones totales de CO₂ estimadas a partir de la incineración de RSU por lecho fluidizado rotativo

Emisiones	Ton/año	Ton equivalentes de CO ₂
CO ₂	3.779'024.663,46	3.779'024.663,46
CH ₄	0	0
N ₂ o	114,80	30.422,12
Total de ton de CO ₂		3.779'055.085,58

Fuente: Elaborado por Autores (2017)

Con los datos correspondientes en Ton equivalente de CO₂ para cada variable se estimó la reducción de emisiones de la siguiente manera.

$$RE = (7.849'471.187,18 \text{ Ton eq CO}_2 + 727.499,256 \text{ Ton eq CO}_2) - 3.799'055.085,58 \text{ Ton eq CO}_2$$

$$RE = 4.071'143.600,85 \text{ Ton eq CO}_2$$

La reducción de emisiones corresponde al 52% de las emisiones de las emisiones del relleno sanitario durante el año 2015, aunque la generación de energía también genera emisiones su participación no es tan significativa. El sistema de incineración por lecho fluidizado disminuye considerablemente las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con el relleno sanitario.

Conclusiones

La caracterización de los residuos sólidos urbanos es determinante a la hora de estimar las emisiones producidas por un sistema de valorización energético y la producción de energía eléctrica. Las variables de peso, composición porcentual, porcentaje de húmeda y poder calorífico son necesarias al momento de evaluar y diseñar cualquier sistema con fines de recuperación energética ya que al ser los residuos el combustible de los procesos térmicos, depende del tipo de residuo y sus características la eficiencia del sistema y la producción de emisiones de contaminantes.

El sistema de valorización energético que se adoptó a las condiciones planteadas por los autores para el Relleno Sanitario Doña Juana, es la tecnología de incineración, esta permite la reducción del volumen de los residuos en un 98% y el aprovechamiento energético de todos los residuos sólidos. Sin embargo, la incineración del plástico incrementa las emisiones de dióxido de carbono, dioxinas y furanos, estos gases son perjudiciales para el medio ambiente y la salud humana. La alternativa para reducir la incorporación del plástico en los sistemas de aprovechamiento energético, es la recuperación de este en un 80% por medio del reciclaje, esta medida debe ser integrada en el esquema de recolección y regulada por la UAESP.

La producción de energía eléctrica por medio del Sistema de incineración de lecho fluidizado rotativo propuesto para el RSDJ contribuye al 2,73% y 2,80% de la oferta eléctrica nacional, su contribución oscila desde el 19,30% al 20,22% respecto al consumo total en la ciudad de Bogotá. Representa un aporte considerable en términos de generación de electricidad a partir de una fuente no convencional (residuos sólidos), su posible incorporación al sistema eléctrico permitirá incluir otro tipo de energías no convencionales y sustituir progresivamente el uso de combustibles fósiles.

De acuerdo a las estimaciones de emisiones para el relleno sanitario doña Juana y para la tecnología de incineración de lecho fluidizado rotativo se determinó que se reducen las emisiones de GEI en un 52%, la gestión de los RSU del RSDJ por medio de la tecnología de incineración presento la reducción de un poco más de la mitad de emisiones de CO₂ que se generaran por medio de la gestión de RSU en el relleno sanitario para el año 2015.

Recomendaciones

Para dimensionar el sistema de incineración de lecho fluidizado rotativo en los componentes económico, social, ambiental se deberá elaborar un estudio de pre factibilidad, contemplando las condiciones actuales y futuras en la producción per cápita de residuos y el aumento poblacional de la ciudad de Bogotá. El diseño del sistema debe estar sujeto a las necesidades de la ciudad, los recursos y la problemática específica de la ciudad, con el propósito de evitar posibles brechas que afecten el diseño.

Se debe considerar contemplar un método de evaluación de impacto ambiental proporcional a la magnitud del proyecto, ya que en Colombia aún no está contemplada una metodología para plantas de incineración se considera prudente desarrollar la evaluación por la metodología más fiable, cuantitativa y objetiva.

Referencias

- A.D.A.M. (25 de Enero de 2015). *Intoxicación con monóxido de carbono*. Obtenido de MedlinePlus: <https://medlineplus.gov/spanish/ency/article/002804.htm>
- Agro Waste. (2013). *Gasificación*. Madrid: LIFE Enciclopedia.
- Alexánder , G., Klose, W., & Rincón , S. (2008). Pirólisis de Biomasa, Cuesco de Palma de Aceite. Proyecto desarrollado por el grupo BIOT de la Universidad Nacional. *Kassel University*, 2-109.
- Amaya Romero, M. I. (2014). Estudio Eco-Audit comparativo del vidrio contenido en los Residuos Sólidos Urbanos. *Universidad Politécnica de Barcelona .Proyecto de grado para optar por el Título de Ingeniería en Materiales*, 1-55.
- Ambientum . (23 de Octubre de 2016). *Los contaminates atmosféricos*. Obtenido de El portal Profesional del Medio Ambiente. Enciclopedia online: http://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/atmosfera/Los-contaminantes-atmosfericos.asp
- Ambientum. (2003). Residuos de poda y jardinería . *Revista Ambientum On line*, 1.
- Anzola Parra, D. F. (2015). *Estudio del manejo de residuos sólidos en el relleno sanitario Doña Juana con el fin de delinear un borrador de propuesta para el manejo integral de residuos sólidos en la ciudad de Bogotá D.C”* . Bogotá: Tesis para optar al título de Profesional en Gestión y Desarrollo Urbanos, Universidad Colegio Mayor de Nuestra Señora del Rosario.
- Arauzo , J., Bimbela, F., Ábrego, J., Gonzalo, A., & Sánchez, J. L. (2014). Introducción a las tecnologías de aprovechamiento de biomasa. *Boletín Grupo Español Carbón*, No 33,, 2-5.
- Area Metropolitana del Valle de Aburrá. (2006). Manual Para El Manejo Integral De Residuos En El Valle De Aburrá. 1-47.
- Aristizábal , B., Gonzáles , J., & Montes , C. (2003). Retos de la aplicabilidad de la norma colombiana sobre el contro de dioxinas y furanos en incineradores. *Facultad de Ingeniería-Universidad de Antioquia*(28), 17-27.
- Aristizabal, C., & Sáchica, M. S. (2001). *El Aprovechamiento de los residuos sólidos domiciliarios no tóxicos en Bogotá D.C* . Bogotá D.C : Monografía para optar por el Título de Abogadas .

- Armengol, Grau; Farré, Oriol. (2011). *Situación y potencial de valorización energética directa de residuos. Estudio Técnico PER 2011-2020*. Madrid: Instituto para Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE).
- Arvizu Fernández, J. L. (Agosto 2010). La basura como recurso energético. Situación actual y prospectiva en México. *Ingeniería Civil, Edición 496*, 37-43.
- Barrera, X., Gómez, R., & Suárez, R. (2015). El ABC de los compromisos de Colombia para la COP 21. *WWF-Colombia*, 3.
- Belgiorno, V., De Feo, G., Della Rocca, C., & Napoli, R. (2003). Energy from gasification of solid wastes. *Waste Management. Vol 23*, 1-15.
- Benavides, W. F., & Soto, J. A. (2015). EVALUACIÓN DE LAS POSIBILIDADES DE COLECCIÓN, PURIFICACIÓN Y APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS GENERADO EN EL RELLENO SANITARIO LA ESMERALDA DE LA CIUDAD DE MANIZALES. *Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Ambiental. Universidad Católica de Manizales*.
- Bogotá. (02 de Octubre de 2015). Derrumbe en el relleno de Doña Juana prende las alarmas. *El tiempo*.
- Canastero Ríos, R. D. (2014). APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS DE LA MADERA Y SU POSIBLE REUTILIZACIÓN EN FABRICACIÓN DE BIOMASA GENERADA EN BOGOTÁ. *Proyecto de Grado para optar por el título de Ingeniero de producción. Universidad Distrital Francisco José De Caldas*, 1-99.
- Castells, X. E. (2005). *Tratamiento y valorización energética de residuos*. Cataluña, España: Diaz De Santos.
- Castro de Esparza, M. L. (1995). *Curso Internacional de Rellenos Sanitarios y de Seguridad*. Lima: CEPIS.
- Cedano de León, D. (2013). Valorización Energética De Residuos Como Combustibles Alternativos En Plantas Cementeras. *Tesis Máster en Seguridad Industrial y Medio Ambiente*. , Universidad Politécnica De Valencia .
- Cerdá, E. (2009). Energía Obtenida a partir de biomasa. *cuadernos económicos de ice n.º 83*, 117-140.
- Cid Coffré, A. T. (2016). Análisis Técnico Económico De Planta Térmica De Generación De Energía Eléctrica A Partir De Residuos Sólidos Municipales Para Santiago De Chile. *Memoria Para Optar Al Título De Ingeniero Civil Eléctrico. Universidad de Chile, facultad de ciencias físicas y matemáticas.*, 29-47.

- Collazos, H. (1998). Deslizamiento de Basura en el Relleno Sanitario Doña Juana. *CEPIS*, 1-38.
- Congreso de la República de . (2014). Ley 1715. *Diario Oficial No. 49.150 del 13 de mayo*.
- Congreso de la Republica de Colombia. (2002). Decreto 1713. *Diario Oficial 44893 del 7 de agosto*.
- Congreso de la Republica de Colombia. (2013). Decreto 2981. *Diario Oficial 49010 de diciembre 20* .
- Consejo de Bogotá D.C. (2013). Proyecto de Acuerdo 194 de 2013. *Anales Del Concejo*.
- Contreras , C. (2006). MANEJO INTEGRAL DE ASPECTOS AMBIENTALES - RESIDUOS SÓLIDOS. *Diplomado Gestión Ambiental Empresarial Para Gestión Ambiental Empresarial Para Funcionarios De ETB. Pontificia Universidad Javeriana*.
- Coronado Cárdenas, O. L., Sotelo Rojas, H., & Chávez Porras, Á. (2011). Diseño y Proyección logística de un centro de acopio y manejo de residuos sólidos para el Relleno Sanitario Doña Juana. *Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 1-14.
- Dellavedova, M. G. (2016). Guía Metodológica para la elaboración de una evaluación de impacto ambiental. *Teorías Territoriales y planificación Territorial. Universidad Nacional de la Plata. Facultad de Arquitectura y Urbanismo*.
- DÓLAR-COLOMBIA. (04 de Noviembre de 2016). Obtenido de Conversor de moneda: <http://www.dolar-colombia.com/calculadora/?fecha=2016-11-04&valor=85&conversion=usd-cop>
- El Tiempo. (13 de Octubre de 2015). Doña Juana puede ir hasta 2030. *El Tiempo*.
- Elías Castells, X. (2012). *Tratamiento y Valorización Energetica de los Residuos Sólidos*. Madrid : Díaz de Santos, S.A.
- FAO - Roma. (1993). El gas de madera como combustible para motores. *Capítulo 5. Pequeño grupo electrógeno con gasificador en Sri Lanka*.
- FAO. (2004). *Terminología Unificada Sobre Bioenergía*. CAPITULO 5. Parámetros, unidades y factores de conversión.

- Fundación para la Salud Geoambiental. (23 de Octubre de 2016). *El Dióxido de azufre SO₂*. Obtenido de Fundación para la Salud Geoambiental: <http://www.saludgeoambiental.org/dioxido-azufre-so2>
- García, J. P., & Padilla, Y. A. (2014). RETOS DE LA ADMINISTRACIÓN DISTRITAL EN LA RECOLECCIÓN Y DISPOSICIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS. *ECONOGRAFOS: ESCUELA DE ECONOMÍA*(63), 15.
- GASIFICATION & SYNGAS. (16 de Octubre de 2016). *Waste to Energy Gasification*. Obtenido de GASIFICATION & SYNGAS - TECHNOLOGIES COUNCIL: <http://www.gasification-syngas.org/applications/waste-to-energy-gasification/>
- GIZ, S. D. (1999). *Análisis del mercado de los residuos sólidos municipales reciclables y evaluación de su potencial de desarrollo*. Berlín, Alemania: Dirección General de Normatividad y Apoyo Técnico; Deutsche Gesellschaft FÜR Technische Zusammenarbeit GMBH.
- Gobierno de Chile. (Diciembre de 2001). TECNOLOGIAS DE TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS DOMICILIARIOS. *Comisión Nacional Del Medio Ambiente*, 16-26.
- Gómez , A., Klose , W., Rincón , S., & Wiest, W. (2004). Transformación termoquímica de la biomasa residual del proceso de extracción del aceite de palma: tecnologías y perspectivas. *Palmas*, 25, 388.
- Gooding Garavito, N. (2009). *BALANCE DE MATERIA PARA* . Bogotá: Septima Edición, UNAL.
- GREENPEACE. (2011). *Nuevas Tecnologías para el tratamiento de los residuos urbanos: viejos riesgos y ninguna solución*. Buenos Aires.
- Hefa, C., & Yuanan, H. (2010). Municipal solid waste (MSW) as a renewable source of energy: Current and future practices in China. *Bioresource Technology*. *ELSEVIER*.101, 3816-3824.
- Hernández Cid, Á. (2010). Nuevas Tecnologías para el Tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos en el D.F. *Tesis para optar por el título de Ingeniero Industrial, Universidad Nacional Autónoma de México*, 1-96.
- Huang, C. J., & Dalton, C. (1975). *ENERGY RECOVERY FROM SOLID WASTE*. Houston, Texas: NASA CR- 2525.
- Ibañez, J. R., & Corropoli, M. D. (2002). Valorización de Residuos Sólidos Urbanos. *F.C.E. – Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco*, 43-74.

- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & CANCELLERÍA. (2015). *Primer Informe Bienal de Actualización de Colombia ante la CMNUCC - Resumen Ejecutivo*. Bogotá D.C, Colombia.
- Instituto de Investigaciones Eléctricas, IIE. (Octubre 2012). *Guía De Usuario, Generación de electricidad mediante residuos sólidos urbanos*. México D.F: Comisión Federal de Electricidad (CFE).
- Instituto Nacional De Tecnología Industrial. (2010). *Estudio de Prefactibilidad Situación Nacional e Internacional Propuesta para el Desarrollo Local*. Buenos Aires: INTI.
- Instituto para Diversificación y Ahorro de Energía, Madrid. (2010). Guía de valorización energética de residuos. En J. Murúais, & A. Maíllo, *Capítulo 3. La incineración de los residuos sólidos urbanos. Aporte energético y ambiental*. Madrid: Fenercom- Aeversu.
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (2007). *Biomasa: Gasificación*. Madrid: BESEL, S.A.
- INTERNATIONAL ENTERPRISE SINGAPORE. (2012). *Administración de Residuos*. Singapore.
- IPCC. (2006). *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendía L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds)*. Japón: IGES.
- Kiss , G., & Encarnación Aguilar, G. (2006). Los productos y los impactos de la descomposición de residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final. *Gaceta Ecológica, No 79*, 39-51.
- Kunitoshi Sakurai . (10 de Diciembre de 2000). *Hojas De Divulgación Técnica del CEPIS*. Obtenido de Método Sencillo del Análisis de Residuos Sólidos: <http://www.bvsde.paho.org/eswww/proyecto/repidisc/publica/hdt/hdt017.html>
- Lopez, F., & Virviescas, V. (5 de Agosto de 2009). Sobrepeso de residuos sólidos ocasionó un derrumbe en el Relleno Sanitario Doña Juana. (J. C. Vásquez, & Citytv, Entrevistadores)
- Makyu, J. (1998). Doña Juana un Desastre de Basuras. *UMNG*, 116-117.
- Martín, A. R. (Noviembre de 2003). Estudio Técnico de una Central Eléctrica de Incineración de Residuos Sólidos Urbanos. *Proyecto de grado Departament d' Enginyeria Electrónica, Eléctrica i Automàtica, Universitat Rovira i Virgili*, 1-155.

- Martínez Carazo, P. C. (2006). El método de estudio de caso Estrategia metodológica de la investigación científica. *pensamiento & gestión*, 20. Universidad del Norte, 165-193.
- Martínez de León, Celia. (2016). Estudio tecno-económico de una planta de gasificación de residuos sólidos urbanos para aplicaciones de caldera y motor. *Proyecto Fin de Grado Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales, Universidad de Sevilla*, 1-91.
- Master , G., & Wendell, E. (2008). *Introducción a la Ingeniería Medioambiental* (3 ed.). Madrid, España : Pearson Educación .
- Medina Dominguez, A., & Ovejero Sánchez, J. (2010). Termodinamica. *Departamento de Física Aplicada. ETSII de Bejar. Universidad de Salamanca*, 2-31.
- MÍGUEZ TABARÉS, J. L. (2016). CAPÍTULO 9 PROCESOS TERMOQUÍMICOS PARA LA OBTENCIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE LA FITOMASA RESIDUAL (COMBUSTIÓN, GASIFICACIÓN, PIRÓLISIS).
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible . (13 de Octubre de 2015). *Escuela de Formacion Virtual*. Obtenido de <http://escueladeformacion.minambiente.gov.co/>: <http://escueladeformacion.minambiente.gov.co/>
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. (2011). *Mejores Técnicas Disponibles de referencia europea para Incineración de Residuos.Documento BREF*. Madrid: Sociedad Anónima de Fotocomposición, S.A.
- Morales Gilede, A. (1984). Producción De Energía por Combustión de basuras en Bogotá. *Ingenieria e Investigacion- Energy*, 63-66.
- Moratorio, D., Rocco, I., & Castelli, M. (2012). Conversión de Residuos Sólidos Urbanos en Energía. *Memoria de Trabajos de Difusión Científica y Técnica*, núm. 10, 115-126.
- Morris, M., & Waldheim, L. (1998). Energy recovery from solid waste fuels using advanced gasification technology. *Waste Management. ELSEVIER*, 557-564. Vol 18.
- Noguera, K. M., & Olivero, J. T. (2010). LOS RELLENOS SANITARIOS EN LATINOAMÉRICA: CASO COLOMBIANO. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*34 (132), 347-356.
- NULLVALUE. (28 de Septiembre de 1997). EMERGENCIA EN EL SUR POR DERRUMBE EN DOÑA JUANA. *El Tiempo*.

- Oliva, L. (29 de Junio de 2008). Qué hacer con la basura: la encrucijada en el país y el mundo. *La nación*.
- ONGD Manos Unidas. (2016). *PRINCIPALES CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS*. Obtenido de Departamento de estudios y documentación.
- Pabón , J. D. (2003). El Cambio Climático Global y Su Manifestación en Colombia. *Universidad Nacional*, 118.
- Paco Abenza, D. (2012). *Evaluación de efectos de varios tipos de biochar en suelo y planta*. Bellatera: Proyecto fin de carrera Licenciatura en Ciencias Ambientales. Universidad Autónoma de Barcelona.
- PNUMA. (2007). *Perspectivas del Medio Ambiente Mundial GEO4 medio ambiente para el desarrollo*. Dinamarca: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
- Ramírez , F. (25 de 06 de 2014). *Reciclaje de residuos de papel y cartón*. Obtenido de RENOVABLES VERDES: <http://www.renovablesverdes.com/reciclaje-de-residuos-de-papel-y-carton/>
- Rico , S. (12 de Abril de 2016). *METODOLOGÍA DE IDENTIFICACIÓN Y EVALUACIÓN DE IMPACTOS (ADAPTACION DE CONESSA)*.
- Robayo , C. (2012). Diseño de Rellenos Sanitarios. *Módulo didáctico*. Bogotá: *Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD*.
- Roldán, J. (2008). *Fuentes de Energía*. España : Paraninfo.
- Romero Sánchez, A. (2007). Planta de Incineración de residuos sólidos urbanos con recuperación de energía . Proyecto fin de Grado por Optar Título de Ingeniero Industrial. *Universidad Pontificia Comilla, Escuela Técnica Superior De Ingeniería (ICAI)*, 26-28.
- SaludMadrid. (9 de Junio de 2016). *Portal de Salud*. Obtenido de Control de Vectores y Plagas: Manual de Buenas Prácticas: <http://www.madrid.org/cs/Satellite?blobcol=urldata&blobheader=application%2Fpdf&blobheadername1=Content-disposition&blobheadername2=cadena&blobheadervalue1=filename%3DManual+Buenas+Practicas+Control+Vectores+y+Plagas.pdf&blobheadervalue2=language%3Des%26s>
- Sánchez Tolosa, J. L. (2012). Modelación de la incineración de residuos sólidos urbanos como alternativa complementaria al relleno sanitario doña Juana en Bogotá. *Repositorio Institucional - Pontificia Universidad Javeriana*, 1-78.

- Secretaria de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI). (Noviembre, 2000). *MANUAL DE METODOLOGIAS, TOMO IV: Técnica de las matrices de impacto cruzado*. Caracas: Programa De Prospectiva Tecnológica para Latinoamérica y el Caribe.
- Secretaria Distrital de Ambiente. (2010). INFORME TRIMESTRAL DE CALIDAD DEL AIRE DE BOGOTÁ - PRIMER TRIMESTRE 2010. *Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá* , 16-25.
- SEDESOL. (2007). Capítulo 6 Pirólisis. *BVSDE*, 101-105.
- SIEL-Sistema de Información Eléctrico Colombiano. (23 de Febrero de 2017). *Indicadores Oferta* . Obtenido de SISTEMA DE INFORMACIÓN MINERO ENERGÉTICO COLOMBIANO: <http://www.upme.gov.co/Reports/Default.aspx?ReportPath=%2fSIEL+UPME%2fIndicadores%2fIndicadores+Oferta&ViewMode=Detail>
- Sistema Unico de Información de Servicios Públicos - SUI. (20 de Febrero de 2017). *Información Comercial - Departamento - Municipio* . Obtenido de Sistema Unico de Información de Servicios Públicos : http://reportes.sui.gov.co/fabricaReportes/frameSet.jsp?idreporte=ele_com_096
- Steinvorth Álvarez, A., & CEGESTI. (2014). Aprovechamiento energético de residuos sólidos municipales mediante el uso de tratamientos térmicos de avanzada. *Éxito Empresarial*, No 254, 1-4.
- Superintendencia de Servicios Públicos. (2013). *Disposición Final de Residuos Sólidos en Colombia 2013*. Bogotá: Imprenta Nacional De Colombia. Obtenido de Informe Nacional de Disposición Final 2013.
- Superintendencia de Servicios Públicos. (2015). *Disposición Final de Residuos Sólidos Informe Nacional*. Bogotá: DNP.
- Tchobanoglous, G. (1994). *Gestión Integral de Residuos Sólidos Volumen I*. Madrid: McGRAW-HILL/ INTERAMERICANA DE ESPAÑA S.A.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, S. (1998). Tecnologías de Conversión Térmica. En G. Tchobanoglous, H. Theisen, & S. Vigil, *Gestión Integral de Residuos Sólidos Volumen II* (Vol. II, págs. 687-754). Madrid: McGraw-Hill.
- Torre Torre, N. (2013). ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV) Y ESTUDIO ECONÓMICO DE UNA PLANTA DE INCINERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU). *Trabajo Fin de Grado Para acceder al Título de Ingeniería en Tecnologías*. UNIVERSIDAD DE CANTABRIA , 1-93.

- Unidad Administrativa Especial De Servicios Público (UAESP). (17 de Abril de 2011). *Caracterización de los residuos sólidos residenciales generados en la ciudad de Bogotá.* Bogotá. Obtenido de [http://www.uaesp.gov.co/uaesp_jo/attachments/Caracterizaci%C3%B3n/RESIDENCIALES%2002-29-2012\(!\).pdf](http://www.uaesp.gov.co/uaesp_jo/attachments/Caracterizaci%C3%B3n/RESIDENCIALES%2002-29-2012(!).pdf)
- Universidad Industrial de Santander. (2009). GUÍA DE MANEJO DE RESIDUOS SÓLIDOS EN COMEDORES Y CAFETERÍA. 1-13.
- UPME, & Herrera Flórez , H. H. (2015). FACTORES DE EMISION DEL S.I.N. SISTEMA INTERCONECTADO NACIONAL COLOMBIA 2015. *Documento* , 22-24.
- Xinxiang Doing . (26 de Octubre de 2016). *Planta de pirolisis.* Obtenido de http://es.wastetireoil.com/Pyrolysis_faq/Pyrolysis_Plant/pyrolysis_plant_rector_149.html
- Zafra, C. A., & Gutiérrez, V. (2015). Análisis de la producción de lixiviado y biogás bajo condiciones de extracción activa en un relleno sanitario. *INGENIUM*, 16(31), 10-11.
- Zaman, A. U. (2010). Comparative study of municipal solid waste treatment technologies using life cycle assessment method . *International Journal of Environmental Science and Technology*, 225-234.
- Zapata Meneses, A., & Estrada, C. A. (Agosto 2004). GASIFICACIÓN DE BIOMASA PARA PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLES DE BAJO PODER CALORÍFICO Y SU UTILIZACIÓN EN GENERACIÓN DE POTENCIA Y CALOR. *Scientia et Technica Año X, No 25. UTP*, 155-159.