

**EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS PARA LA DISPOSICIÓN FINAL DE
RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS MEDIANTE EL ANÁLISIS DE CICLO DE
VIDA. CASO DE ESTUDIO: BOGOTÁ**

**ASTRID CAROLINA MURCIA CASTRO
CAMILO ANDRÉS RODRIGUEZ VELÁSQUEZ**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS, SEDE BOGOTÁ
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C
DICIEMBRE 2017**

**EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS PARA LA DISPOSICIÓN FINAL DE
RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS MEDIANTE EL ANÁLISIS DE CICLO DE
VIDA. CASO DE ESTUDIO: BOGOTÁ**

**ASTRID CAROLINA MURCIA CASTRO
CAMILO ANDRÉS RODRIGUEZ VELÁSQUEZ**

**PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIEROS
AMBIENTALES**

DIRECTOR: ING. NIDIA ISABEL MOLINA GOMEZ

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS, SEDE BOGOTÁ
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C
DICIEMBRE 2017**

Nota de aceptación:

Firma del presidente Jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C, Diciembre de 2017

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quisiéramos agradecer a nuestras familias por brindarnos su apoyo incondicional y por darnos la oportunidad de estudiar y llegar a ser ingenieros ambientales.

A la ingeniera Nidia Isabel Molina por la dedicación, colaboración y acompañamiento, quien nos ayudó a orientar y culminar nuestro proyecto de grado, a la ingeniera Angela Bello de la universidad de Medellín quien aportó su conocimiento para el desarrollo de esta tesis, a la ingeniera Paola Becerra por su orientación y soporte, y por último a la ingeniera Nidia Ortiz por su orientación en la fase de los cálculos energéticos.

Por último, nos gustaría agradecer a Fernando Párraga y William Chica funcionarios de la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos (UAESP), Planta de Biogás Doña Juana. S.A por la información suministrada, lo cual sirvió de soporte para nuestra investigación.

RESUMEN

La generación de los residuos sólidos urbanos (RSU) en la ciudad de Bogotá ha venido incrementándose en los últimos años según informes de la unidad administrativa especial de servicios públicos UAESP [1]. Para el caso de Bogotá se cuenta una disposición per cápita en relleno sanitario de 0,28 Ton RSU/Habitante para el año 2016 [2]. El sistema actual de disposición final de RSU es el Relleno sanitario Doña Juana, el cual tiene una licencia que expira en 4 años [3], por lo que será necesario buscar tecnologías que complementen el sistema de disposición final y aumentar la vida útil del relleno sanitario, pues la actual organización territorial no cuenta con el espacio suficiente ni las características del terreno apropiadas para una expansión [4].

Por lo anterior se llevó a cabo este proyecto, en el cual se evaluaron tecnologías de tratamiento y disposición final de residuos sólidos urbanos (RSU) mediante un análisis de ciclo de vida (ACV) con ayuda del software SimaPro. Logrando determinar que para el escenario 0 (sistema actual de disposición final de RSU) los puntos críticos fueron planta de lixiviados y emisiones de degradación en las celdas de disposición, debido al vertimiento de lixiviados y emisiones de gases efecto invernadero respectivamente.

A fin de comparar el comportamiento de los escenarios se aplicó la metodología del ACV, al escenario 0 y a otros dos escenarios establecidos bajo la metodología multicriterio de proceso analítico jerárquico AHP por sus siglas en inglés (Escenario 1: separación-incineración-relleno sanitario y Escenario 2: separación-incineración-relleno sanitario-compostaje). Encontrando que el mejor desempeño ambiental para la ciudad se muestra en el Escenario 1, adicionalmente se evidenció que la recuperación energética en la planta de biogás para relleno sanitario y en el tratamiento térmico para la incineración, es fundamental ya que permite compensar los impactos negativos asociados al funcionamiento de estos métodos de tratamiento y disposición final de RSU.

Palabras claves: Análisis de ciclo de vida, tratamiento, disposición final de residuos sólidos urbanos, recuperación energética, residuo sólido urbano

ABSTRACT

The generation of urban solid waste (RSU) in the city of Bogotá has been increasing in recent years according to reports from the special administrative unit of public services UAESP [1]. In the case of Bogotá, there is a disposition per capita in landfill of 0.28 Ton RSU / inhabitant for the year 2016 [2]. The current system of final disposal of RSU is Doña Juana Landfill, which has a license that expires in 4 years [3], so it will be necessary to look for technologies that complement the final disposal system and increase the useful life of the landfill sanitary, since the current territorial organization does not have enough space or the characteristics of the land suitable for an expansion [4].

Therefore, this project was carried out, in which technologies for the treatment and final disposal of urban solid waste (MSW) were evaluated through a life cycle analysis (LCA) with the help of SimaPro software. Achieving determine that for scenario 0 (current system of final disposal of RSU) the critical points were leachate plant and emissions of degradation in the disposal cells, due to the dumping of leachates and greenhouse gas emissions respectively.

In order to compare the behavior of the scenarios, the LCA methodology was applied to scenario 0 and to two other scenarios established under the Hierarchical Analytic Process Multi-Criteria methodology (Scenario 1: sanitary separation-incineration-landfill and Scenario 2: separation-incineration-sanitary landfill-composting). Finding that the best environmental performance for the city is shown in Scenario 1, additionally it was evidenced that the energy recovery in the biogas plant for sanitary landfill and in the thermal treatment for the incineration, is fundamental since it allows to compensate the associated negative impacts to the operation of these methods of treatment and final disposal of RSU.

Keywords: Life cycle assesment, management, final diposal of municipal solid waste, Municipal Solid Waste, Energy recovery

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	11
2.	OBJETIVOS	13
2.1	Objetivo general.....	13
2.2	Objetivos específicos	13
3.	MARCO REFERENCIAL	14
3.1	Marco Teórico	14
3.1.1	Análisis de Ciclo de Vida (ACV)	14
3.1.2	Métodos de tratamiento y disposición final de Residuos Sólidos Urbanos RSU	18
3.2	Marco Metodológico	21
3.2.1	ETAPA 1. Contexto de la problemática.....	21
3.2.2	ETAPA 2. Selección de tecnologías o combinación de tecnologías para el tratamiento y disposición final de RSU que puedan ser una oportunidad para Bogotá.	21
3.2.3	ETAPA 3. Evaluación y diagnóstico del sistema actual del manejo de RSU en la etapa de disposición final mediante un ACV (Escenario 0).....	24
3.2.4	ETAPA 4. Evaluación de los escenarios seleccionados mediante un ACV.....	26
4	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	27
4.1	Panorama actual de gestión de RSU en Bogotá.....	27
4.2	Criterio de selección tecnologías para la disposición final de RSU.....	31
4.2.1	Características de los escenarios	31
4.3	Análisis de ciclo de vida del sistema actual de disposición (Relleno Sanitario- Escenario 0)	34
4.3.1	Fase 1: Objetivo y Alcance	34
4.3.2	Análisis de inventario	37
4.3.3	Evaluación del impacto de ciclo de vida (EICV)	40
4.4	Análisis de ciclo de vida de los escenarios	52
4.4.1	Límites del sistema.....	52
4.4.2	Fase 2: Evaluación del inventario de ciclo de vida	52
4.4.3	Fase 3 y 4: Evaluación de ciclo de vida e interpretación	57
5	CONCLUSIONES.....	63
6	RECOMENDACIONES.....	65
7	BIBLIOGRAFÍA.....	67

Lista de tablas

Tabla 1: Ejemplo de la etapa 1 del EICV- clasificación (ReCiPe)	17
Tabla 2: Métodos de tratamiento y disposición final de RSU	19
Tabla 3: Valoración de alternativas	22
Tabla 4: Escalas de la metodología AHP	23
Tabla 5: Matriz vector de prioridad de alternativas, metodología AHP	23
Tabla 6: Matriz valoración parámetros	23
Tabla 7: Vector prioridad de parámetros, metodología AHP	24
Tabla 8: Metodología AHP aplicada al proyecto	33
Tabla 9: Tabla de entrada de RSU para cada escenario	34
Tabla 10: Inventario de ciclo de vida escenario 0- Relleno Sanitario Doña Juana	39
Tabla 11: Categoría de impacto seleccionada	41
Tabla 12: Resultados Escenario 0 categoría de impacto por proceso	42
Tabla 13: Factores de aporte a la categoría de toxicidad humana	45
Tabla 14: Factor caracterización ecotoxicidad de agua dulce	47
Tabla 15: Composición RSU Cantabria	53
Tabla 16: Inventario de ciclo de vida de planta incineradora	54
Tabla 17: Inventario ciclo de vida de compostaje	57
Tabla R: Vector de prioridad escenarios según sensibilidad a la composición	75
Tabla S: Vector de prioridad de escenarios según sensibilidad a la carga	75
Tabla T: Vector de prioridad de escenarios según ocupación del espacio	75
Tabla U: Vector de prioridad de escenarios según Impactos ambientales	76
Tabla V: Vector de prioridad de escenarios según políticas del país	76
Tabla W: Vector de prioridad de parámetros de criterio	76

Lista de Figuras

Figura 1 Diagrama ACV ISO 14040	15
Figura 2: Metodología aplicada del presente proyecto.....	21
Figura 3: Promedio diario de RSU por año	27
Figura 4: Composición de los RSU en Bogotá	28
Figura 5: Esquema propuesto en el programa basura cero	29
Figura 6: Limites del análisis del ciclo de vida para escenarios de tratamiento y disposición final	36
Figura 7: Cuantificación de flujos del relleno sanitario Doña Juana.....	38
Figura 8: Fases descomposición de los residuos sólidos en relleno sanitario	43
Figura 9: Contribución de procesos en la cadena del Diesel en la categoría de agotamiento de capa ozono	44
Figura 10: Impacto de toxicidad humana- electricidad voltaje bajo.....	45
Figura 11: Acidificación terrestre- Electricidad bajo voltaje	46
Figura 12: Evaluación del daño- Aporte de procesos a las categorías de impacto	47
Figura 13: Caracterización- Aporte de procesos a las categorías de impacto con recuperación energética.....	48
Figura 14: Normalización mid-point del escenario 0 sin recuperación energética.....	49
Figura 15: Contaminantes categoría de Cambio climático	49
Figura 16: Contaminantes categoría de Ecotoxicidad de agua dulce.....	50
Figura 17: Normalización mid-point escenario 0 con recuperación energética.....	50
Figura 18:End-point Escenario 0.....	51
Figura 19: Evaluación Endpoint escenario 0 con recuperación energética	52
Figura 20: Cuantificación de flujos.....	54
Figura 21: Evaluación de la contribución de los escenarios 0,1 y 2.....	58
Figura 22: Normalización mid-point comparación escenarios.....	59
Figura 23: Evaluación Endpoint comparando los escenarios	60
Figura 24: Análisis de sensibilidad- cambio climático.....	61
Figura 25: Análisis de sensibilidad- Ecotoxicidad de agua dulce	62

Lista de Anexos

Anexo 1: aplicación metodología AHP para la selección de escenarios de tecnologías para la disposición final de residuos sólidos urbanos.....	75
Anexo 2: Descripción Procesos Relleno Sanitario	77
Anexo 3: Arboles de contribución de procesos	88
Anexo 4: Descripción de procesos de incineración	92
Anexo 5: Inventario de los escenarios 1	103
Anexo 6: Inventario del escenario 2	107

1. INTRODUCCIÓN

El manejo y disposición integral de los residuos sólidos es un factor a analizar y evaluar; se ha presentado un incremento en la población a nivel mundial de aproximadamente un 1% con respecto al año 2015 [5], esta situación conlleva directamente a una tendencia de aumento en la generación de residuos sólidos urbanos (RSU), en donde para Bogotá se espera un incremento de 1,42 Kg/Habitante siendo aproximadamente un 0,22 Kg/Habitante más para el año 2025 [6], esto equivale a 2,2 millones de toneladas de RSU anuales en Bogotá.

En Colombia se evidencia una producción de 27.000 toneladas diarias de residuos sólidos que son llevados a sitios de disposición final [7], la disposición de residuos sólidos se realiza a través de rellenos sanitarios principalmente en diferentes departamentos [7], plantas integrales donde se separan los residuos para ser reincorporados a la cadena productiva, celdas de contingencia y celdas transitorias en departamentos como Arauca, Cauca, Santander y Tolima, botaderos a cielo abierto, descarga a cuerpos de agua y quema de residuos en los departamentos de Antioquia, Chocó, Nariño y Bolívar [8].

En el caso específico de Bogotá se producen diariamente cerca de 6.500 toneladas, de los cuales el 70% son aprovechables [9], y sólo un 16,1% se aprovechan [10]. Estos son dispuestos en el relleno sanitario Doña Juana el cual presenta más de 40 años de operación, tiempo en el que se han presentado falencias en su gestión [10].

La inapropiada gestión de los residuos sólidos puede ocasionar enfermedades, desvalorización de terrenos, generación de malos olores, proliferación de vectores entre otros [10]. El relleno sanitario Doña Juana en Bogotá tiene una vida útil que perdurará aproximadamente hasta el año 2021 [10]. Por lo que es necesaria la evaluación de sistemas de tratamiento de los residuos sólidos para disminuir la carga en el relleno sanitario.

Si no se realizan estudios de sistemas alternativos de tratamiento de los RSU para la ciudad no se sabrá con certeza si se podrá implementar tecnologías que complementen el marco de la gestión integral de residuos sólidos en la etapa de disposición final en la ciudad, con el fin de reducir la carga de residuos que llegan al relleno Doña Juana cuya vida útil es tan sólo de 6 años. Al finalizarse la vida útil del relleno se creará la necesidad de buscar otro sitio de disposición final con características similares pero la actual organización territorial de la ciudad no cuenta con un espacio suficiente para la adecuación de un terreno con tales características, únicamente se cuentan con pequeñas ampliaciones. [4]

Dentro de los sistemas alternativos para el tratamiento de los residuos sólidos urbanos (RSU) se encuentran los procesos físicos, químicos, biológicos y térmicos [11]. De la gran mayoría de los sistemas se obtiene un producto que puede ser aprovechado en un sinnúmero de procesos y productos como producción de abono, biocombustible, gas sintético, entre otros; lo cual significa una disminución de la carga contaminante que se lleva a disposición final y en consecuencia aumenta la vida útil del relleno sanitario [12]. Adicionalmente es necesario realizar evaluaciones ambientales, sociales y económicas que permitan la toma de decisiones pertinente a partir de estudios técnicos.

Las herramientas que se usan para la evaluación de los impactos ambientales de productos, procesos y sistemas son: el Análisis de ciclo de vida (ACV), el análisis costo beneficio (ACB), la evaluación del riesgo ambiental (ERA), la evaluación de impacto ambiental (EIA), entre otros. Dentro de estas herramientas la más utilizada en estudios ya realizados para evaluar sistemas de tratamiento de residuos sólidos es el ACV [13], ya que con esta herramienta se podrá evaluar el desempeño ambiental de diferentes sistemas y compararlos para identificar puntos importantes para la toma de decisiones. [14]

Es por ello que este proyecto, tiene como objetivo la evaluación de sistemas de tratamiento de residuos sólidos urbanos de Bogotá, utilizando un análisis de ciclo de vida. Para ello fue necesario realizar un análisis del sistema actual de disposición final llevado a cabo en la ciudad de Bogotá (Rellano Sanitario Doña Juana), y así mismo, se realizó una selección tecnologías para el tratamiento y disposición final de RSU con la metodología multicriterio AHP, obteniendo como resultado dos escenarios que combinan tecnologías que podrían ser implementadas en la ciudad. Posteriormente se sometieron a evaluación los dos escenarios junto con el sistema actual de disposición final de RSU.

La investigación está compuesta por siete secciones inicia con esta inducción y los objetivos del proyecto; a partir del tercer capítulo se encuentra el marco referencial con algunos conceptos clave para el desarrollo del proyecto y el marco metodológico que explica las etapas llevadas a cabo desde la recolección de la información primaria y secundaria hasta la obtención de resultados; el cuarto capítulo muestra los resultados obtenidos y su análisis; en el capítulo quinto se presentan las conclusiones y por último los capítulos sexto y séptimo contienen respectivamente las recomendaciones y bibliografía consultada respectivamente.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Evaluar sistemas de disposición final de residuos sólidos urbanos (RSU) de Bogotá mediante un análisis de ciclo de vida (ACV).

2.2 Objetivos específicos

- Diagnosticar el panorama actual de la gestión de los residuos sólidos urbanos en la ciudad de Bogotá
- Identificar dos escenarios de gestión de residuos sólidos urbanos con un criterio de selección de tecnologías
- Realizar una evaluación de las alternativas de disposición final de RSU generados en Bogotá mediante un ACV

3. MARCO REFERENCIAL

3.1 Marco Teórico

3.1.1 Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

El ACV es una herramienta que permite evaluar las descargas ambientales asociadas a un producto, identificando las operaciones unitarias que componen el sistema productivo, cuantificando las entradas (materia y energía) y salidas (productos, emisiones, vertimientos o residuos), y brindando como resultado los impactos que se pueden generar a lo largo del ciclo de vida del producto; de esta manera permite la toma de decisiones para efectuar mejoras ambientales asociadas al sistema productivo [15] [16].

El análisis de ciclo de vida surge con la necesidad de identificar los impactos ambientales asociados a un producto en su ciclo de vida, de esta manera se busca mejorar la eficiencia en el uso de recursos naturales, materias primas e insumos; identificar oportunidades de mejora en las etapas del ciclo de vida del producto, y una reducción en la contaminación y riesgos ambientales.

El ACV resulta ser de gran utilidad en la consolidación de la información de algún sistema productivo ya que considera de forma sistémica los aspectos e impactos ambientales, desde la extracción de materias primas hasta el tratamiento cuando sea convertido en un residuo a tratar en disposición final, dependiendo el objetivo y alcance establecidos. Es por ello que resulta pertinente en la implementación de estándares con indicadores de desempeño ambiental y de esta manera se puede hacer efectiva la participación de las autoridades ambientales. [15] [16] [17]

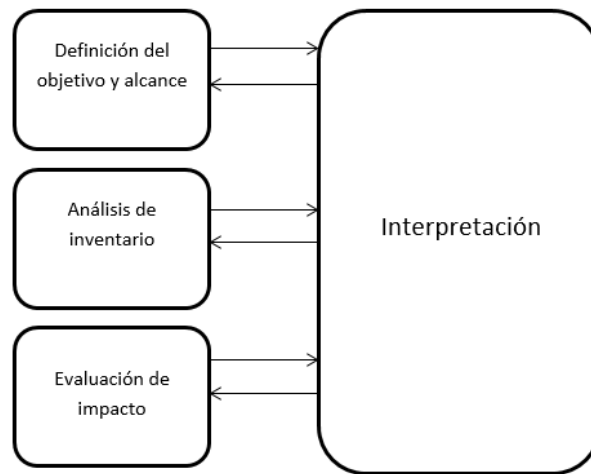
Existen cinco maneras de abordar un análisis de ciclo de vida (ACV) en relación a los límites de estudio, clasificándose en [18]:

- De la puerta a la puerta (Gate to Gate): En donde se consideran únicamente las etapas asociadas al proceso productivo al que aplique.
- De la cuna a la puerta (Cradle to Gate): Tiene en cuenta procesos de extracción hasta la transformación de materias primas en el proceso productivo de la empresa.
- De la puerta a la tumba (Gate to Grave): Además de tener en cuenta el proceso productivo incluye la fase de gestión de los residuos que abarque el producto.
- De la cuna a la tumba (Cradle to Grave): Estudia la transformación de materias primas hasta la disposición final de los residuos (reciclaje entre otros).

- De la cuna a la cuna (Cradle to Cradle): Abarca el ciclo de vida completo del producto, no sólo incluye transformación de materias primas si no que al finalizar su uso analiza la reincorporación en el mismo proceso productivo o en otro.

El ACV se estandarizó en la ISO 14040 con la finalidad de contribuir a la gestión ambiental en el sector productivo, allí se evidencia la estructura metodológica como se representa en la Figura 1. Para llevar a cabo un ACV se deben cumplir cuatro etapas fundamentales las cuales se describen a continuación:

Figura 1 Diagrama ACV ISO 14040



Fuente: [17]

La **definición del objetivo y el alcance**, es en donde se muestran los motivos del desarrollo y la descripción del estudio; en esta fase se muestra con detalle la profundidad a la que se pretende llegar con el proyecto. Así mismo, se debe evidenciar el uso de los resultados y el tipo de información que se esperan obtener.

En esta etapa se incluye además la definición del alcance del ACV en donde se muestra la extensión del estudio, esto implica el establecimiento de los límites del sistema para dar a entender el alcance del análisis y sus resultados.

En esta etapa también se selecciona la unidad funcional, la cual es utilizada como referencia de las entradas y salidas del sistema con el fin de asegurar que los resultados podrán ser comparados [17]. Además, se define la metodología de evaluación e interpretación de impactos, las limitaciones y los requisitos en cuanto a la calidad de los datos.

La siguiente fase es el análisis **de inventario de ciclo de vida (ICV)** que consiste en cuantificar las entradas y salidas del sistema, allí se ingresan el uso de recursos como materias primas y energía, emisiones a la atmósfera, vertidos al agua y suelo y generación de residuos. Es recomendable utilizar datos de medidas in situ, de balance de materia y energía o de entrevistas, fuentes bibliográficas entre otros. [18]

Con el fin de hacer un inventario completo en el que se presente una visión integral del proceso a evaluar es necesaria la realización de diagramas de flujo, en donde se evidencien claramente los componentes y líneas de producción asociadas a cada producto; así mismo, se debe generar una descripción detallada de cada proceso, esquematizando los datos de ingreso de entradas y salidas, especificando los métodos de cálculo empleados y las técnicas para su recolección.

Adicionalmente, en el análisis de inventario se muestran las fuentes documentales y limitaciones que se pueden presentar asociados a la obtención de los datos en conjunto con las suposiciones que puedan prestarse para efectos del estudio. [18]

Una vez obtenidos los datos del inventario se deben relacionar con la unidad funcional escogida, para así realizar un análisis de sensibilidad que permita la toma de decisiones con respecto a los límites del sistema, exclusión de etapas del ciclo de vida que carezcan de importancia, o por el contrario la inclusión de algunos procesos unitarios [18].

La tercera fase que compone un ACV es la **evaluación de impacto de ciclo de vida (EICV)**, en donde se relacionan los resultados del ICV con la magnitud de los impactos potenciales que se pueden generar [18]. La EICV consta de 4 etapas: i) Selección de categorías de impacto, ii) clasificación, iii) caracterización y iv) elementos opcionales. En la etapa de selección de categorías de impacto se incluyen los aspectos ambientales asociados a la línea productiva evaluada, en esta etapa se justifican las categorías seleccionadas, los indicadores de categoría y los modelos de caracterización.

.

En cada categoría de impacto se deben evidenciar los indicadores de cada categoría, siendo estos la representación cuantificable de los resultados, así mismo se deben identificar los puntos finales, definiendo punto final como compuestos o contaminantes que aportan significativamente a las áreas de protección definidas en cada metodología de evaluación [18]. En la *Tabla 1* se muestra un ejemplo, se

incluye una de las áreas de protección definidas en la metodología ReCiPe, que es una metodología de evaluación de impactos de ACV usada internacionalmente.

Tabla 1: Ejemplo de la etapa 1 del EICV- clasificación (ReCiPe)

Categoría	Punto Final	Indicador	Área de protección
Cambio Climático	Metano bormotrifluoruro, Halon 1301	Kg CO ₂ eq	Salud Humana
	Metano clorotrifluoruro, CF-13		
	Dióxido de Carbono		
	Metano		
	Monóxido de dinitrógeno		

Fuente: Autores

La segunda etapa consiste en la clasificación, la cual es la agrupación de las cargas ambientales asociadas al consumo de recursos y a la generación de emisiones, residuos y vertimientos en función de los efectos ambientales que produce cada una de ellas.

La tercera etapa consiste en la caracterización o contribución potencial de cada compuesto. Por ejemplo, para el cálculo de la categoría acidificación, hay tres indicadores que contribuyen al impacto como NO₂ NO_x y SO₂, que al final serán representados por una sola unidad; para este caso se toma como referencia SO₂ y se expresa el resto en unidades equivalentes del indicador de referencia, es decir, SO₂ equivalentes.

Por último, se debe realizar un análisis de elementos opcionales, entre los que se encuentran dos procedimientos estadísticos (normalización y ponderación). La normalización se utiliza para verificar si existen incoherencias o informar sobre la importancia relativa de un indicador dividiéndolo en un valor de referencia; en la ponderación se convierten los resultados de los indicadores en factores numéricos basados en juicios de valor propios del software. [18]

En esta etapa se incluye el análisis de la calidad de los datos que puede ser llevado a cabo mediante tres procedimientos estadísticos como (análisis de gravedad,

análisis de incertidumbre y análisis de sensibilidad) en los que se busca identificar el dato que podría generar una variación significativa en los resultados del EICV.

La cuarta y última fase es la **interpretación del ACV**, en donde se relacionan los resultados del ICV con los de la EICV y se generan nuevos resultados que pertenecen al objetivo y alcances definidos. En esta fase se pueden presentar ajustes en el proceso, sustitución de materias primas, cambios para mejoras, entre otros. La interpretación del ACV comprende tres componentes: identificación de aspectos ambientales significativos, la evaluación o verificación de análisis de integridad, sensibilidad y coherencia y por último la elaboración de conclusiones, definición de limitaciones del estudio y recomendaciones.

3.1.2 Métodos de tratamiento y disposición final de Residuos Sólidos Urbanos RSU

Los RSU son materiales producto de las actividades diarias, los cuales pueden ser desechados o aprovechados mediante un sistema de tratamiento para su disposición final. Este tipo de residuos se clasifican en inorgánicos como vidrios y metales; y orgánicos biodegradables como restos de fruta, verduras, entre otros [19]. Para efectos del presente proyecto se excluyen de este grupo los residuos de poda que puedan ser generados por actividades diarias.

Para efectos del presente documento las tecnologías estarán comprendidas por unos métodos y procesos, de esta manera se manejará dentro del documento métodos para la disposición final de RSU y procesos físicos y químicos que combinados conforman una tecnología.

Los RSU son tratados y/o dispuestos a través de métodos como el relleno sanitario, incineración, el compostaje, la digestión anaerobia y la gasificación. Estos métodos se describen en la Tabla 2.

Tabla 2: Métodos de tratamiento y disposición final de RSU

Métodos de tratamiento y disposición final de RSU		
Tipo de proceso	Método	Descripción
Físicos	Relleno Sanitario	Esta tecnología consiste en un lugar definido para realizar el confinamiento definitivo de los residuos sólidos, es un área o excavación en donde se depositan los residuos. En este se dan procesos de degradación y generación de lixiviados que deben ser tratados para evitar vertimientos con altos contenidos de contaminantes a cuerpos de agua; en algunos rellenos sanitarios se realiza la quema y aprovechamiento del biogás para evitar la emanación de gases de efecto invernadero a la atmósfera. [20]
	Separación	Permite separar los compuestos aprovechables del total de RSU, se realiza con el fin de obtener el mayor provecho a los residuos y evitar una mala disposición de ellos. Este método tiene una gran influencia en el desempeño de otros métodos de disposición final, ya que permite segregar los residuos más factibles a disponer en cada uno, debido a que no todos los métodos pueden tratar todos los componentes de los RSU. [21]
Biológicos	Compostaje	En este método se procesa la fracción orgánica de los residuos sólidos que es generalmente del 40-60%, mediante la acción del contenido microbiano presente, realizando la fermentación controlada y acelerada. Existen algunos factores que intervienen en el correcto funcionamiento del compostaje como temperatura, humedad, pH, relación C/N y población microbiana, de estos depende la óptima transformación del sustrato. El resultado obtenido (Compost) es un producto estable que puede ser usado como abono orgánico o acondicionador de suelos. [22]
	Digestión anaerobia	La digestión anaerobia es un proceso biológico que permite la descomposición de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos en ausencia de oxígeno, mediante la presencia de microorganismos anaerobios que en un ambiente propicio convierten la materia orgánica en biogás y lodos. [23] Esta tecnología tiene un leve impacto ambiental, debido a que evita la emisión incontrolada de metano y permite el aprovechamiento del biogás para la generación de energía eléctrica. Sin embargo, es un proceso que no funciona con todos los tipos de residuos sólidos, debe asegurarse que los residuos ingresen con unas características y cantidades específicas para el correcto desempeño del sistema. [24]

Métodos de tratamiento y disposición final de RSU		
Tipo de proceso	Método	Descripción
Destrucción térmica	Incineración	Es un método mediante el cual los residuos son sometidos a altas temperaturas reduciendo su volumen y peso en un 90 %, y transformándolo en materia inerte, escorias calor y gases. Este proceso térmico requiere que los residuos alcancen un poder calorífico de al menos 1200 kCal/Kg, en adición la incineración puede tratar RSU, residuos peligrosos y residuos hospitalarios. [25] La incineración es un proceso que funciona efectivamente para zonas densamente pobladas; sin embargo, genera altos impactos ambientales por la generación de gases ácidos, gases de efecto invernadero, dioxinas y furanos entre otros; es por ello que se debe acompañar este método con dispositivos de control de emisiones para cumplir la regulación ambiental (caso Bogotá resolución 909/2008). Por otro lado, la incineración permite realizar una recuperación energética que puede ser utilizada como autoabastecimiento o ser distribuida en red eléctrica [25].
	Gasificación	La gasificación es un proceso térmico para la disposición final de los residuos sólidos urbanos, los cuales son sometidos a mayores temperaturas que la incineración usando menor cantidad de aire, transformándolos en syngas, escoria y gases. [26] Al igual que la incineración este proceso permite generar un aprovechamiento energético de los residuos en forma de electricidad o combustible. Sin embargo, no se pueden ingresar todas las fracciones de los RSU, dado que se necesita que contengan carbono para lograr un buen desempeño. [27]

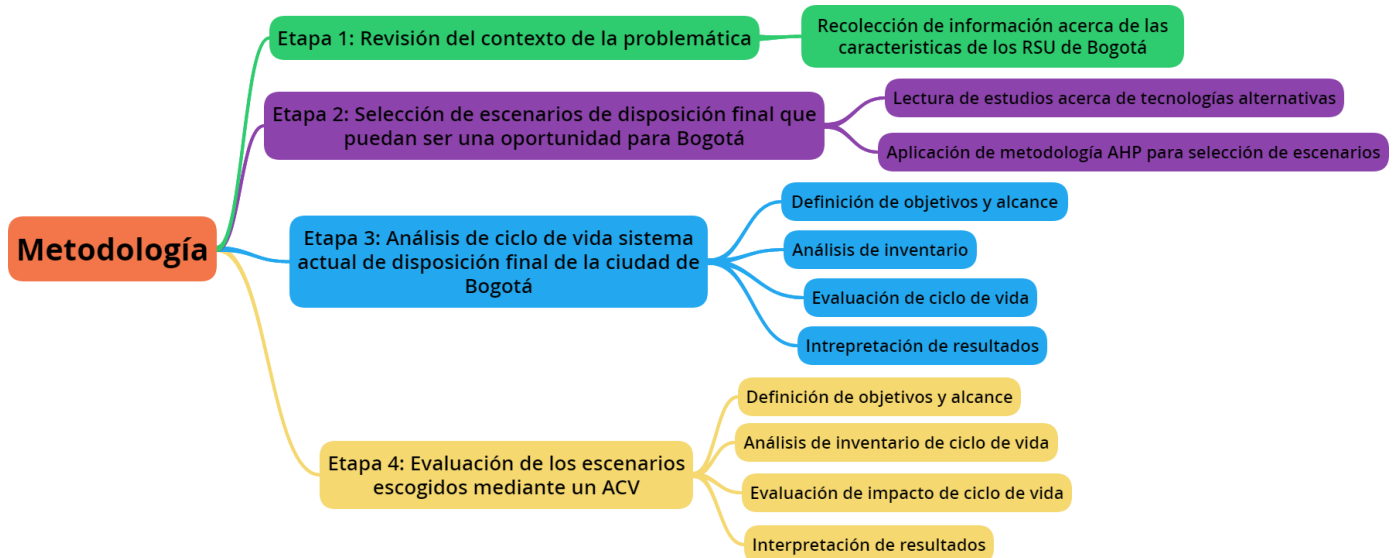
Fuente: Autores

La combinación de métodos de tratamiento y disposición final como incineración-separación-relleno sanitario (SIR), separación-digestión anaerobia-relleno sanitario (SDAR), incineración- relleno sanitario (IR), separación-compostaje-incineración-relleno sanitario (SCIR) y separación-gasificación-relleno sanitario (SGR) podrían generar un sistema de disposición de RSU con un mayor porcentaje de eficiencia. [28]

3.2 Marco Metodológico

En la Figura 2 se presenta la metodología desarrollada para el presente proyecto, la cual se estructura por etapas y actividades.

Figura 2: Metodología aplicada del presente proyecto.



Fuente: autores

3.2.1 ETAPA 1. Contexto de la problemática

Para establecer un contexto o panorama actual de la gestión de los RSU en la ciudad de Bogotá, se realizó una revisión de los antecedentes históricos presentes en informes de la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos (UAESP) e investigaciones realizadas por diferentes universidades para Bogotá [10]; se realizó una comparación con información de lo corrido del año 2017 y cuyo registro es el más reciente en materia de gestión de RSU, enfatizando en el sistema de disposición final, su problemática y finalmente las características de los residuos sólidos urbanos como la tasa de generación y la composición.

3.2.2 ETAPA 2. Selección de tecnologías o combinación de tecnologías para el tratamiento y disposición final de RSU que puedan ser una oportunidad para Bogotá.

Debido a la diversidad de sistemas para el tratamiento de RSU se realizó una revisión bibliográfica de métodos de tratamiento como incineración, gasificación, biometanización, pirólisis, digestión anaerobia, entre otros [29], con el fin de

establecer los escenarios técnicamente factibles para su implementación en la ciudad de Bogotá.

Los escenarios fueron sometidos a un criterio de selección basado en la metodología multicriterio AHP (Analytical Hierarchy Process, por sus siglas en inglés) dado que es una herramienta que ha demostrado ser útil para la solución de problemas que involucran la selección de diferentes alternativas [15]. La metodología AHP utiliza comparaciones entre pares de elementos construyendo matrices a partir de estas comparaciones, y usando fundamentos de álgebra para establecer prioridades entre los elementos de un nivel con respecto a un elemento inmediatamente superior. Cuando el nivel de importancia en cada criterio es definido se incluyen a una matriz para obtener la alternativa más viable según el tema de estudio. [30]

La notación utilizada es la siguiente:

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

Una vez revisadas las alternativas mediante una caracterización de parámetros sociales, económicos, políticos y técnicos se establecieron los parámetros sobre los cuales se tomó la decisión, seguido a esto, se realizó el análisis por pares, es decir, se compararon las alternativas frente a cada uno de los criterios de manera par a par evaluándolos como se muestra en la Tabla 3 y utilizando la escala definida en la Tabla 4.

Tabla 3: Valoración de alternativas

Parámetro	Parámetro 1		
Alternativas	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Alternativa 1	w_{1j}, w_1	w_{1j}, w_2	w_{1j}, w_3
Alternativa 2	w_{2j}, w_2	w_{2j}, w_2	w_{2j}, w_3
Alternativa 3	w_{3j}, w_3	w_{3j}, w_2	w_{3j}, w_3
Sumatoria	w_{j1}	w_{j2}	w_{j3}

Fuente: Elaboración propia con base en [30]

Tabla 4: Escalas de la metodología AHP

Escala	Definición	Descripción
1	Igualmente preferida	Los dos criterios contribuyen igual al objetivo.
3	Moderadamente preferida	La experiencia y el juicio favorecen un poco a un criterio frente al otro.
5	Fuertemente preferida	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente a un criterio frente al otro
7	Muy fuertemente preferida	Un criterio es favorecido muy fuertemente sobre el otro. En la práctica se puede demostrar su dominio.
9	Extremadamente preferida	La evidencia favorece en la más alta medida a un factor frente al otro

Fuente: [30]

Es necesario normalizar las matrices obtenidas para hallar el vector de prioridad, es decir, hay que dividir cada término de la matriz sobre la suma de las columnas, para luego promediar los valores de la fila como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5: Matriz vector de prioridad de alternativas, metodología AHP

Parámetro	Parámetro 1			
Alternativas	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Vector de prioridad
Alternativa 1	$(W_{1j}, W_1) / W_j$	$(W_{1j}, W_2) / W_j$	$(W_{1j}, W_3) / W_j$	Promedio fila Alternativa 1
Alternativa 2	$(W_{2j}, W_1) / W_j$	$(W_{2j}, W_2) / W_j$	$(W_{2j}, W_3) / W_j$	Promedio fila Alternativa 2
Alternativa 3	$(W_{3j}, W_1) / W_j$	$(W_{3j}, W_2) / W_j$	$(W_{3j}, W_3) / W_j$	Promedio fila Alternativa 3
Sumatoria	W_{j1}	W_{j2}	W_{j3}	

Fuente: Elaboración propia con base en [30]

Una vez valoradas las alternativas, se repitió el mismo procedimiento para los parámetros, es decir, se construyó una matriz de valoración de parámetros (Ver Tabla 6) y una matriz de vector de prioridad (Tabla 7).

Tabla 6: Matriz valoración parámetros

	Parámetro 1	Parámetro 2	Parámetro 3
Parámetro 1	W_{1j}, W_1	W_{1j}, W_2	W_{1j}, W_3
Parámetro 2	W_{2j}, W_2	W_{2j}, W_2	W_{2j}, W_3
Parámetro 3	W_{3j}, W_3	W_{3j}, W_2	W_{3j}, W_3
Sumatoria	W_{j1}	W_{j2}	W_{j3}

Fuente: Elaboración propia con base en [30]

Tabla 7: Vector prioridad de parámetros, metodología AHP

	Parámetro 1	Parámetro 2	Parámetro 3	Vector de prioridad
Parámetro 1	$(W_{1j}, W_1) \setminus W_j$	$(W_{1j}, W_2) \setminus W_j$	$(W_{1j}, W_3) \setminus W_j$	Promedio fila Parámetro 1
Parámetro 2	$(W_{2j}, W_1) \setminus W_j$	$(W_{2j}, W_2) \setminus W_j$	$(W_{2j}, W_3) \setminus W_j$	Promedio fila Parámetro 2
Parámetro 3	$(W_{3j}, W_1) \setminus W_j$	$(W_{3j}, W_2) \setminus W_j$	$(W_{3j}, W_3) \setminus W_j$	Promedio fila Parámetro 3

Fuente: Elaboración propia con base en [30]

Con los vectores de prioridad de cada parámetro de la matriz de prioridad de alternativas (Tabla 5) se formó una matriz de importancia, la cual se multiplicó matricialmente con el vector de prioridad obtenido al realizar la comparación entre parámetros (Tabla 7). El resultado fue un vector de alternativas que constituye la solución al problema siendo el de mayor valor la mejor alternativa según los parámetros [30]. Para efectos del presente proyecto se escogieron los dos vectores de alternativas con mayor valor, siendo estos el escenario 1 y el escenario 2; el escenario 0 es el sistema actual de disposición final de RSU de la ciudad, el cual se toma como escenario de partida o escenario base.

3.2.3 ETAPA 3. Evaluación y diagnóstico del sistema actual del manejo de RSU en la etapa de disposición final mediante un ACV (Escenario 0).

Durante la etapa tres se desarrollaron tres fases (definición de objetivo y alcance, análisis del inventario de ciclo de vida y evaluación de impacto de ciclo de vida) como se pueden ver en el marco teórico, los cuales se describen a continuación.

- Definición del objetivo y el alcance

Como primer paso se estableció la unidad funcional con base en la información disponible de las entidades públicas encargadas de la disposición final de RSU en Bogotá, estudios afines a la investigación que tienen información acerca de alternativas para el manejo de RSU [31] [32] [26] [28] y las unidades manejadas por el software Simapro.

Posteriormente se establecieron, los límites del sistema, enmarcando el estudio únicamente en el análisis del desempeño ambiental de los métodos de tratamiento y disposición final de RSU, sin tener en cuenta procesos de generación, transporte, infraestructura y de aprovechamiento asociados al producto final de estos; para ello se hizo uso de experiencias internacionales en estudios similares. [28]

Por último, se seleccionó la metodología de evaluación de impactos, lo cual se logró mediante el análisis de estudios de caso y los aspectos definidos en la estándar ISO14040 [28] [33].

- Análisis de inventario de ciclo de vida (ICV)

Se realizó una descripción detallada de los procesos unitarios que conforman la disposición final de RSU en el relleno sanitario Doña Juana y el centro de acopio La Alquería, para así construir diagramas de cuantificación de flujos en los cuales se incluyeron entradas y salidas por cada proceso.

Los datos presentes en el diagrama fueron extraídos de información primaria brindada por la subdirección de disposición final de la UAESP, la empresa Biogás Doña Juana¹ y Ciudad Limpia²; Adicionalmente se hizo uso de información secundaria proveniente del expediente No. 1919 de licenciamiento del Relleno Sanitario Doña Juana brindado por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) [34], informes mensuales de disposición final publicados por la UAESP en la página web oficial³ y fichas técnicas de la maquinaria que operan en el proceso.

Finalmente se elaboró una tabla del inventario de los datos que ingresan al modelo de los escenarios (entradas y salidas) y su nombre análogo en el software Simapro, que por defecto están en el idioma Inglés.

- Evaluación del impacto ciclo de vida (EICV)

Para el desarrollo del EICV se siguieron las etapas descritas en el marco de referencia (selección de categorías de impacto, clasificación, caracterización y elementos opcionales)

✓ Selección categoría de impacto

La metodología del análisis de ciclo de vida (ACV) contempla la clasificación de categorías para evaluación de impactos mediante metodologías como ReCiPe Midpoint [35], Impact 2002+, CML-IA [26], entre otros. Luego de haber seleccionado un método de evaluación se procedió a la selección de las categorías más relevantes para la evaluación de métodos de tratamiento y disposición final de RSU, adicionalmente se tuvo en cuenta casos de estudio similares.

¹ Gerente de operaciones de la empresa d Biogás Doña Juana- Fernando Párraga

² Operarios de la empresa Ciudad limpia

³ Informes mensuales de supervisión y control de disposición final

✓ Clasificación

Posteriormente se ingresaron los datos del inventario al software y se procedió al modelamiento del ciclo de vida del primer escenario referente al Relleno Sanitario Doña Juana (RSDJ) y separación en centro de acopio, mediante el montaje y estructuración de los procesos con sus respectivos datos de entradas y salidas. Seguidamente se generó la red de contribución de procesos con ayuda del software Simapro, a fin de observar que operación unitaria tiene mayor contribución por cada categoría de impacto.

✓ Caracterización

Consecutivamente se hizo un análisis de aporte de contaminantes por categoría de impacto, a partir de los gráficos de barras generados por el software y con base en los procesos más significativos evidenciados en la red de contribución para identificar que contaminantes podrían causar una mayor problemática.

✓ Elementos opcionales

Una vez realizado el análisis de aporte de contaminantes, se define el proceso que genera mayor daño con respecto a la carga ambiental del mundo; para ello se realiza la normalización como uno de los elementos opcionales, cuyo principio parte de la estandarización de todas las categorías a una unidad general, denominada MPt (Milipuntos).

Finalmente se realizó un análisis de sensibilidad para conocer el dato que al ser modificado generó grandes cambios en los resultados, esto se realizó mediante una gráfica de correlación.

3.2.4 ETAPA 4. Evaluación de los escenarios seleccionados mediante un ACV.

Para la evaluación de la comparación de los escenarios 0, 1 y 2 se aplicó la misma metodología presentada en la etapa 3 para el escenario 0, siguiendo los lineamientos de la ISO 14040.

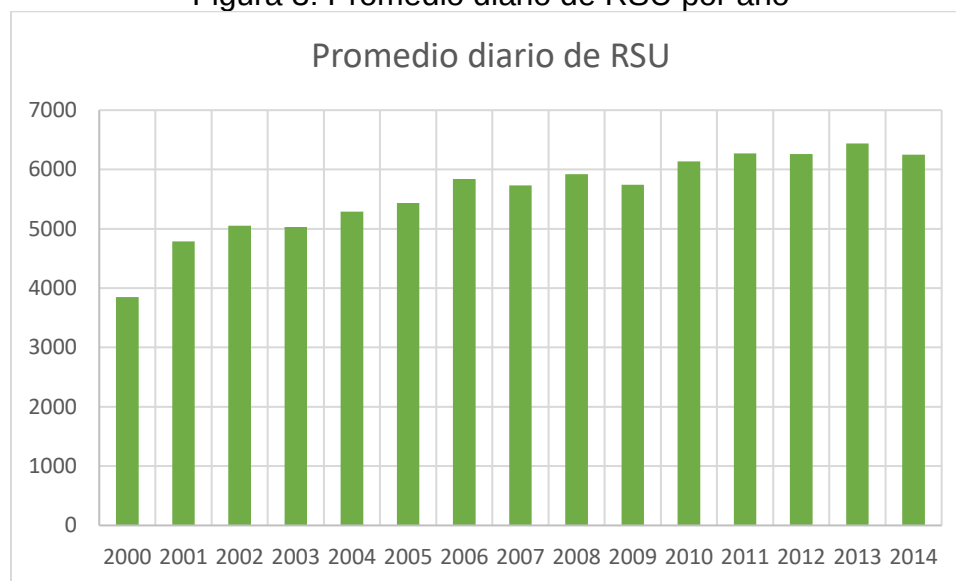
4 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Panorama actual de gestión de RSU en Bogotá

Bogotá es una ciudad con gran afluente poblacional, según el DANE para el año 2014 la población de la ciudad se estima en 7'776.845 habitantes que generan aproximadamente 6.200 Ton/día [36]. Adicionalmente tiene un crecimiento económico basado en un consumo lineal, el cual es considerado como insostenible [37], dado que desde el año 2000 ha aumentado la generación de RSU de 3.852 Ton/día a 6.250 Ton/día (Ver Figura 3) según los informes publicados en la web por la UAESP.

Según el DANE para el año 1960 la población de Bogotá redondeaba los 831.799 habitantes [38], aumentando en consecuencia los RSU [37]. La ciudad, no ha optimizado sus políticas en materia de gestión de residuos sólidos, se tiene el mismo sistema de disposición final de RSU que opera desde el año 1988; aunque desde el 2007 opera la planta de biogás del relleno siguen presentándose falencias en el proceso operativo y no se ha pensado en promover un enfoque integral [37].

Figura 3: Promedio diario de RSU por año



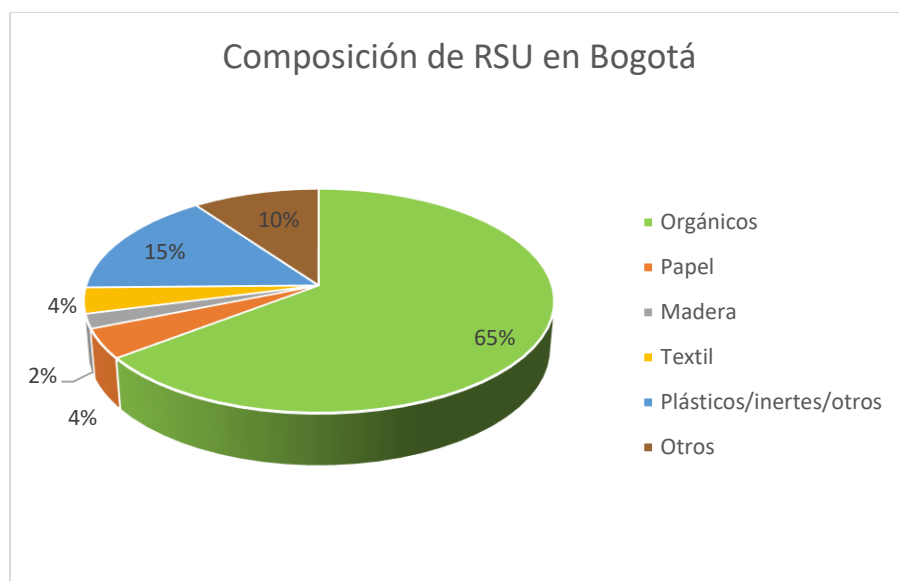
Fuente: [1]

En consecuencia, se han presentado inconvenientes con la gestión de RSU; por ejemplo, en el año de 1997 se generó una explosión y avalancha de residuos sólidos por el mal manejo de los gases y lixiviados producto del confinamiento de residuos [19], en el año 2015 se presentó deslizamiento de una de las zonas de residuos [39], generando molestias en la zona de influencia directa propiciando

manifestaciones como la ocurrida en el año 2017 por la proliferación de vectores en los barrios de Mochuelo Alto y Bajo [40]. Esto muestra que en la ciudad de Bogotá la gestión de los residuos sólidos no es suficiente.

En la Figura 4 se muestran los porcentajes de la composición de los RSU en la ciudad de Bogotá, en donde predomina la fracción orgánica seguida de material inerte como el plástico y en menor proporción madera, papel y textil.

Figura 4: Composición de los RSU en Bogotá



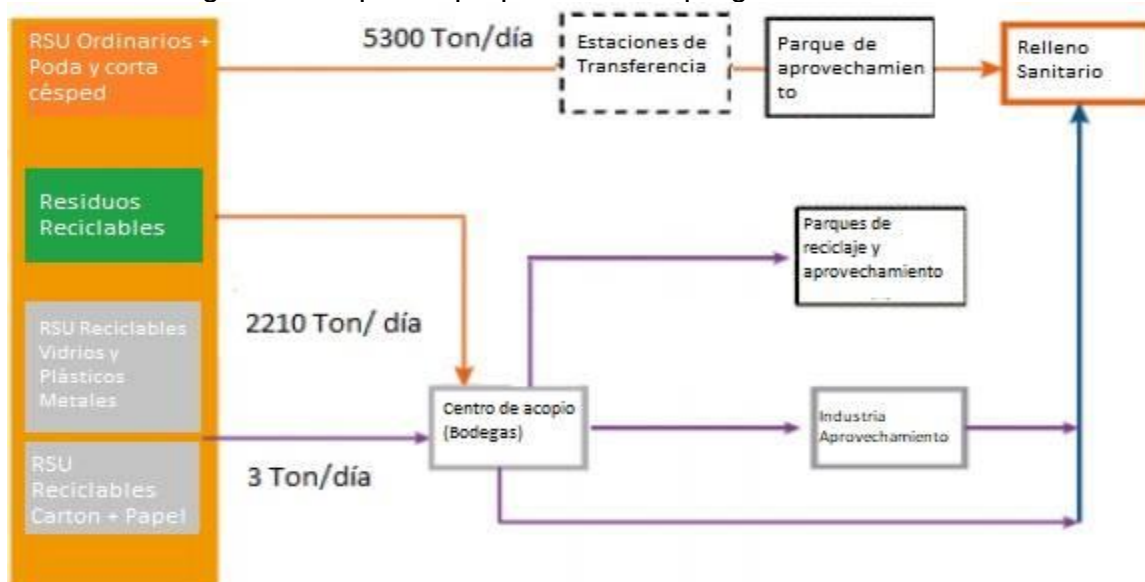
Fuente: autores con base en [41]

Con el ánimo de realizar mejoras a la gestión integral de los RSU en el año 2006, mediante el Decreto 312, se adoptó el Plan de gestión integral de residuos sólidos (PGIRS) de la ciudad de Bogotá, cuyo esquema de funcionamiento se basa en el tratamiento de los residuos ordinarios (en Relleno Sanitario, centro de acopio y plantas de reciclaje) y los residuos orgánicos (en planta de compostaje) con el fin de ofrecer un mejor tratamiento a los diferentes componentes de los RSU sacando un aprovechamiento de ellos. Sin embargo, la cantidad aproximada de residuos que se separa en los centros de acopio es de 8.431,11 Ton/mes, siendo muy baja en comparación con el total de residuos urbanos que son enviados a disposición final 175.243,5 Ton/mes [41], lo que limita la correcta disposición de RSU.

En busca de disminuir la cantidad de residuos sólidos enviados a relleno sanitario, fomentar la separación en la fuente y aprovechamiento de los mismos, se plantea el programa basura cero en el año 2013 en el plan de desarrollo 2012-2016

institucionalizado en el distrito capital (Ver Figura 5) [42]. Sin embargo, desde el año 2010 no ha sido posible disminuir la generación de RSU a menos de 6000Ton/día (Ver Figura 3).

Figura 5: Esquema propuesto en el programa basura cero



Fuente: [43]

Para contextualizar explícitamente la manera en la que se gestionan los residuos sólidos urbanos en la ciudad de Bogotá se describen a continuación tres etapas que componen su sistema de gestión de RSU (Recolección y transporte, Disposición final, Separación y reciclaje).

- Recolección y transporte

Según el decreto 2981 del 2013 se debe realizar una separación de los residuos ordinarios identificando residuos aprovechables [44]. Las empresas recolectoras establecen un micro y macroruteo con un horario y frecuencia de recolección programada. La recolección en el centro de la ciudad se realiza 7 días/semana y en área urbana 3 días/semana, la frecuencia de recolección domiciliaria se da en dos turnos (diario y nocturno) dependiendo el sector y las empresas de recolección. [45] La recolección en Bogotá está a cargo de empresas privadas como Ciudad Limpia, Aguas de Bogotá, Lime, Aseo capital y Ecocapital; y población recuperadora.

- Disposición final (Relleno Sanitario Doña Juana)

El Relleno Sanitario Doña Juana fue inaugurado en el año 1988 a manos de consorcio Colombo-americano IGESAN-URS que en el año 1997 produjo un deslizamiento por mal manejo de los residuos, por lo que fue transferida la concesión a Proactiva en el año 2000 [10]. Actualmente el manejo del relleno está a manos el consorcio GCR Doña Juana.

Es importante resaltar que el RSDJ no cumplió con estudios de viabilidad técnica, por lo tanto, se tuvo que realizar un cambio del terreno el cual se había provisto en la localidad de Usme y se modificó para la localidad de ciudad Bolívar. Con el paso de los años el RSDJ ha alcanzado ciertos desafíos en materia ambiental como en el año 2008 inaugurando la planta de Biogás, la cual ha permitido mitigar la emisión de Gases efecto invernadero (GEI) y sacar provecho de los gases de descomposición mediante la recuperación energética por acción de generadores.

- Separación y reciclaje

La recuperación de materiales en Bogotá se maneja bajo dos esquemas: Rutas selectivas- empresa privada y Población recicladora- recuperadora. Estos agentes entregan los residuos potencialmente recuperables como son los residuos ordinarios (envolturas de alimentos, servilletas, residuos de barrido, residuos sanitarios, entre otros) y orgánicos (restos de comida) a centros de acopio como la Alquería, Usme, Tunjuelito, Villa Hermosa, entre otros.

En estos centros el material es separado manualmente y comercializado a empresas cuya materia prima no necesariamente tiene que ser virgen. Debido a que el principio de funcionamiento de los centros de acopio en Bogotá es manual, la eficiencia no es tan alta teniendo una capacidad de 1600 Ton/mes a comparación de un centro automatizado cuya capacidad es de 3000 Ton/mes [46].

Es importante resaltar que se ha venido trabajando en la ciudad de Bogotá por la inclusión de la población recicladora en el sistema de gestión de residuos sólidos de la UAESP, mediante el plan de inclusión adoptado desde el año 2012 [47]. Esta población presenta una problemática de tipo socio-económico encontrando que la mayor parte de esta población se encuentra en estratos 1 y 2 con ingresos menores al Salario mínimo legal vigente⁴ [48].

⁴ SMLV 2017 \$737.717 COP

Adicionalmente, en el año 2016 se modificó el esquema de aprovechamiento mediante el Decreto 596, el cual reglamenta el aprovechamiento de los residuos sólidos a nivel nacional. Como primera instancia establece que los residuos deben segregarse en la fuente para que los organismos encargados puedan recogerlos y transportarlos hasta las estaciones de clasificación y aprovechamiento (ECA). Estos organismos están sujetos a una libre competencia del material aprovechable, esto quiere decir que cualquier entidad o persona debidamente registrada puede sacar provecho de los residuos sólidos del país. Los recuperadores de oficio al estar registrados deberán conformarse como empresa para poder vincularse a la unidad de servicios públicos, esto implica pago de impuestos y obligaciones laborales [49]. Lo cual no permite que los recicladores de oficio puedan entrar en la libre competencia, pues como se mencionó anteriormente son una población vulnerable que no tienen mecanismos financieros suficientes para el pago de las obligaciones.

4.2 Criterio de selección tecnologías para la disposición final de RSU

En países como Ankara [31], Sakarya [50], Suecia [26], Sorocaba [26], China [28], Minna [51] y Naples [32] se han aplicado diferentes métodos para el tratamiento de RSU como incineración, digestión anaerobia, gasificación, entre otras. Por lo que basados en la experiencia internacional, los niveles de ingreso⁵ y la composición de los RSU⁶, los escenarios sometidos a proceso de evaluación fueron: a) separación-incineración-relleno sanitario (SIR), b) separación-digestión anaerobia-relleno sanitario (SDAR), c) incineración- relleno sanitario (IR), d) separación-compostaje-incineración-relleno sanitario (SCIR) y e) separación-gasificación-relleno sanitario (SGR).

4.2.1 Características de los escenarios

Siguiendo la metodología multicriterio AHP se procede a la selección de parámetros: Sensibilidad a la composición de los residuos (características físicas y químicas que debe tener el residuo al disponerse, que al tener otras características no podrá ser dispuesta en ese sistema) , capacidad de carga de la combinación de métodos de disposición final de RSU (capacidad de tratamiento en cuanto a peso), ocupación del espacio (área ocupada por el sistema) e impactos ambientales enfocados a las emisiones atmosféricas debido a la generación de gases en la disposición final de RSU y políticas a futuro del país⁷ dado que se tenían en cuenta en las metodologías de ACV observadas en la revisión bibliográfica u otros documentos relevantes en la investigación [52] [53].

⁵ Niveles de ingreso medio alto: Ankara, Sakarya, Sorocaba, China y Colombia [93]

⁶ Los países de China y Suecia poseen composición de RSU similar a la de Colombia [41]. La composición oscila en un rango de 50-65% para residuos orgánicos, entre 15-20% para plástico y 5-15% para papel. [94] [28]

⁷ Como políticas a futuro del país se tuvo en cuenta el Conpes 3874, el cual establece que el país debe reducir sus emisiones de GEI en 10% para el año 2030, por lo que es necesario buscar otras alternativas para la disposición final de los RSU

Alternativa 1: Separación- Incineración-relleno sanitario (SIR):

- Sensibilidad a la composición de los residuos: No es sensible a la composición de los RSU
- Capacidad de carga: Aproximadamente 7.250 Ton RSU/ Día
- Ocupación de espacio: Aproximadamente 800 Ha
- Impactos ambientales: 1,135 Ton CO₂ eq/ Ton RSU [54] [34]

Alternativa 2: Separación-digestión anaerobia-relleno sanitario (SDAR)

- Sensibilidad a la composición de los residuos: Es sensible a la composición de los RSU
- Capacidad de carga: Aproximadamente 6.050 Ton RSU/ Día
- Ocupación de espacio: Aproximadamente 617 Ha
- Impactos ambientales: 1,1378 Ton CO₂ eq. / Ton RSU [55] [34]

Alternativa 3: Incineración- relleno sanitario (IR)

- Sensibilidad a la composición de los residuos: No es sensible a la composición de los RSU
- Capacidad de carga: Aproximadamente 7.200 Ton RSU/ Día
- Ocupación de espacio: Aproximadamente 800 Ha
- Impactos ambientales: 1,135 Ton CO₂ eq/ Ton RSU [54] [34]

Alternativa 4: Separación-compostaje-incineración-relleno sanitario (SCIR)

- Sensibilidad a la composición de los residuos: No es sensible a la composición de los RSU
- Capacidad de carga: Aproximadamente 7.290 Ton RSU/ Día
- Ocupación de espacio: Aproximadamente 820 Ha
- Impactos ambientales: 1,635 Ton CO₂ eq/ Ton RSU [54] [34]

Alternativa 5: Separación-gasificación-relleno sanitario (SGR)

- Sensibilidad a la composición de los residuos: Es sensible a la composición de los RSU
- Capacidad de carga: Aproximadamente 6.040 Ton RSU/ Día
- Ocupación de espacio: Aproximadamente 620 Ha
- Impactos ambientales: 3,46 Ton CO₂ eq/ Ton RSU [56] [34]

A continuación, se presenta la matriz de resultados que muestra los escenarios más propicios a evaluar en la metodología de ACV: Escenario 1: Separación⁸-Incineración-relleno sanitario (SIR) y Escenario 2: separación-compostaje-incineración-relleno sanitario (SCIR). (En Anexo 1 se muestra detalladamente la metodología aplicada).

Tabla 8: Metodología AHP aplicada al proyecto

	Vector prioridad 1	Vector de prioridad 2	Vector de prioridad 3	Vector de prioridad 4	Vector de prioridad 5	Total
SIR	0,442	0,275	0,199	0,297	0,468	0,217
SDAR	0,190	0,082	0,150	0,168	0,140	0,107
IR	0,183	0,170	0,213	0,292	0,166	0,164
SCIR	0,154	0,438	0,245	0,124	0,176	0,174
SGR	0,029	0,034	0,190	0,117	0,047	0,072
Sumatoria	0,114	0,179	0,178	0,242	0,020	

Fuente: Elaboración propia

A cada una de las tecnologías, que hacen parte de los escenarios 1 y 2 priorizados con la metodología AHP, se les asignó un porcentaje de tratamiento teniendo como referencia el total de toneladas de RSU que son enviados a disposición final, y la capacidad tratamiento de los sistemas que han sido implementados en otras ciudades. Para el presente proyecto se utilizó el promedio mensual de generación de RSU en la ciudad de Bogotá, el cual es de 183.854,61 Toneladas RSU, con el fin de establecer un valor de referencia para todos los meses del año, y que los resultados muestren una tendencia asociada a una generación repetitiva en el año.

Los escenarios quedan conformados como se muestra en la *Tabla 9* debido a la capacidad máxima que los métodos de tratamiento y disposición final de RSU pueden asimilar. Es importante resaltar que en Bogotá el relleno sanitario es el sistema principal de disposición final de RSU y es el método con mayor capacidad de carga, se le asignó un mayor porcentaje de tratamiento en cada escenario [37].

⁸ A nivel nacional se especifica en la normativa (Decreto 596/2016) el uso de tecnologías de separación de los residuos en la estaciones de clasificación y aprovechamiento (ECA)

Tabla 9: Tabla de entrada de RSU para cada escenario

Escenario	Tecnología	Capacidad máxima (Ton/mes)	RSU ingresado (Ton/mes)
Escenario 0	Relleno Sanitario (95,41%)	180.000	175.423,50
	Separación centro de acopio (4.59%)	8.500	8.431,11
Escenario 1	Separación planta de separación (15%)	3.000	27.578,19
	Relleno Sanitario (50%)	180.000	91.927,30
	Incineración (35%)	72.000	64.349,11
Escenario 2	Separación planta de separación (15%)	3.000	27.578,19
	Relleno Sanitario (45%)	180.000	82.734,57
	Incineración (30%)	72.000	55.156,38
	Compostaje (10%)	3.000	18.385,46

Fuente: Autores

4.3 Análisis de ciclo de vida del sistema actual de disposición (Relleno Sanitario- Escenario 0)

Para poder evaluar el desempeño ambiental de la operación del relleno sanitario se usa la metodología del Análisis de ciclo de vida, ya que es fundamental para la toma de decisiones como se describe en la sección 2. Para esto se siguieron los lineamientos expuestos en la sección 3.2. Cabe resaltar que el análisis para el escenario 0 se hizo con y sin la operación de la planta de Biogás, lo anterior con el fin de observar los impactos ambientales asociados únicamente a la operación del relleno, y observar los beneficios ambientales que se obtienen al ser incluida.

4.3.1 Fase 1: Objetivo y Alcance

- Unidad funcional:

Para poder evaluar los diferentes escenarios y generar resultados comparativos se deben calcular todas las variables en una misma unidad, denominada unidad funcional según la ISO 14040. Teniendo en cuenta la producción mensual de RSU en la ciudad de Bogotá, la información secundaria disponible y documentos internacionales [28], la unidad funcional elegida para el desarrollo de este estudio es **Toneladas de RSU/mes** y para datos energéticos se usó **kWh/mes**.

- Límites del sistema

El ACV realizado se limita a la disposición final de Residuos Sólidos Urbanos generados durante un mes en la ciudad de Bogotá. El enfoque utilizado para el ACV es de la *puerta a la puerta (Gate to Gate)*, es decir, que se evalúa desde la entrada

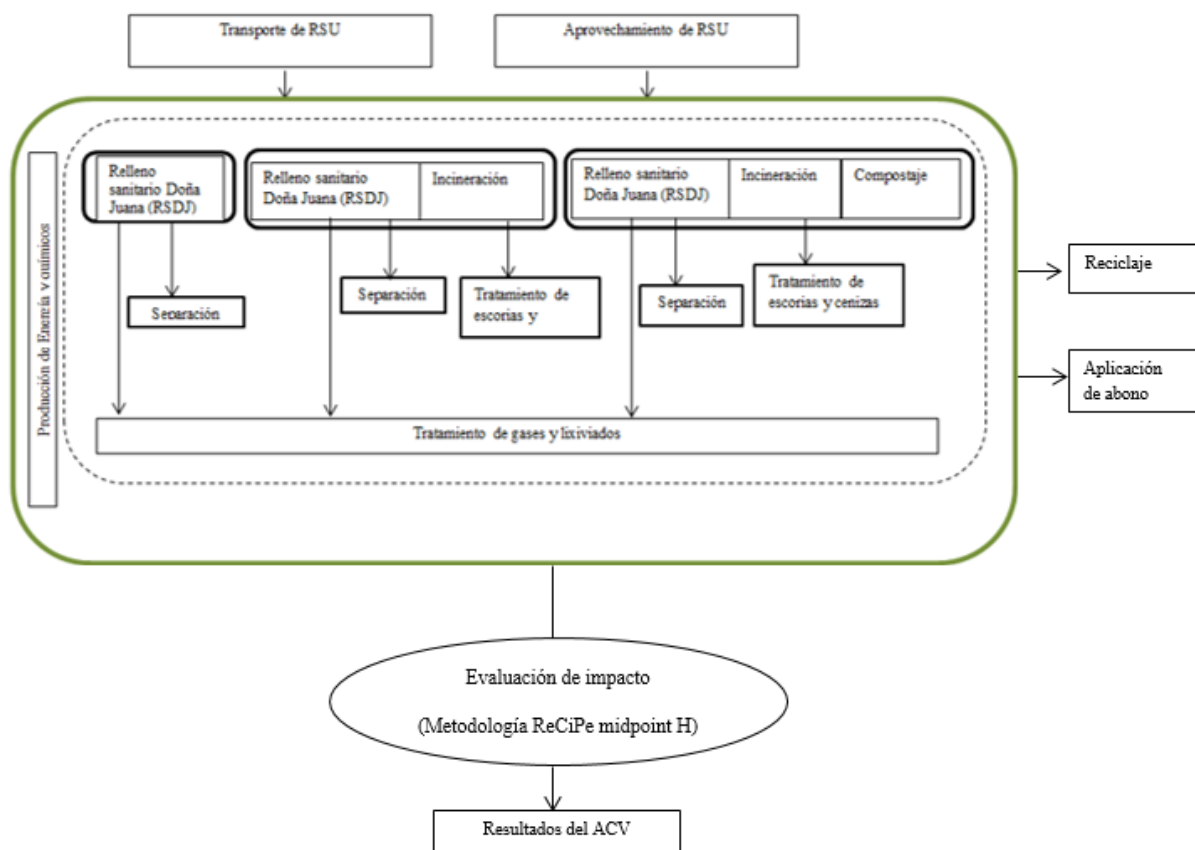
de los RSU al sistema de disposición final hasta la transformación o tratamiento de los residuos como si fuera un proceso productivo [57]. (Ver *Figura 6*)

Dentro de la evaluación para el escenario 0 se incluye: (1) transporte interno desde la puerta del relleno hasta el sitio de descargue (2) Descomposición en celdas, procesos complementarios (uso de maquinaria e insumos) y emisiones directas a la atmósfera por infiltración (3) tratamiento de lixiviados y gases y, (4) Recuperación eléctrica en planta de Biogás.

De modo complementario para los escenarios 1 y 2 se incluye incineración analizando las siguientes etapas: (1) Tratamiento térmico de los RSU (2) Tratamiento de gases (3) Separación magnética de escorias (4) Estabilización de cenizas y (5) Recuperación energética. Adicionalmente para el escenario 2 se incluye: (6) Mezcla de RSU e insumos (7) Emisiones de descomposición.

Se excluyen los siguientes procesos (1) transporte de los RSU desde punto de recolección hasta la puerta del sistema de disposición final (2) aprovechamiento posterior al proceso de separación de residuos en centros de acopio (3) uso del abono producto del compostaje para escenario 2 (4) procesos de infraestructura de los escenarios como adecuación de terreno para la construcción, instalaciones, entre otros. Los cuales están representados fuera de la línea continua de color verde de la (Ver *Figura 6*), es importante resaltar que lo que está representado fuera de la línea punteada hace referencia a una parte del ciclo de vida que toma el software Simapro por defecto.

Figura 6: Límites del análisis del ciclo de vida para escenarios de tratamiento y disposición final



Fuente: Elaboración propia con base en [28]

- Metodología de evaluación de impactos

Para el presente ACV se usó el software SimaPro versión 8.1.1.16 y la base de datos Ecoinvent 3.0 (2014) para obtener la carga ambiental del uso de materiales y energía. Como método de cálculo para la evaluación de impactos se escogió ReCiPe Midpoint y EndPoint H/A v1.12 debido a que son dos de las metodologías más usadas en estudios similares [32], por ejemplo en la evaluación de tecnologías para el tratamiento de RSU en la ciudad de Naples, se logró identificar puntos críticos y potencial de mejora hacia nuevas estrategias de gestión, dado que los datos ingresados se analizaron en conjunto para identificar claramente el aporte a grandes categorías de impacto.

La metodología Midpoint tiene una relación más fuerte con los flujos ambientales y una incertidumbre baja, en cambio la caracterización EndPoint proporciona mejor información de la relevancia ambiental de los flujos ambientales, pero es más incierta.

ReCipe Midpoint H contiene 18 categorías de impacto incluyendo Cambio climático (kg CO₂ eq), Agotamiento capa ozono (Kg CFC-11eq), Acidificación territorial (kg SO₂ eq), Eutrofización de agua fresca (Kg P eq), Eutrofización marina (Kg N eq) Toxicidad humana (Kg 1,4-DB eq), Formación de oxidantes fotoquímicos (Kg NMVOC), Formación de partículas (Kg PM₁₀ eq), Ecotoxicidad terrestre (Kg 1,4-DB eq), Ecotoxicidad en agua dulce (Kg 1,4-DB eq), Radiación ionizante (KBq U235 eq), Ocupación de área agricultura (m²a), Ocupación de área urbana (m²a), Transformación de área natural (m²), Agotamiento de agua (m³), Agotamiento de minerales (Kg Fe eq), Agotamiento fuentes fósiles (Kg oil eq). [58]

Estas categorías de impacto conforman 3 grandes áreas de protección que se pueden visualizar en la metodología Endpoint: Salud Humana-DALY⁹ (Agotamiento capa ozono, toxicidad humana, Radiación ionizante, Formación de oxidantes fotoquímicos, Formación de partículas, Cambio climático), Recursos- \$¹⁰ (Agotamiento fuentes fósiles, Agotamiento de minerales, Agotamiento de agua) y Ecosistemas Especies/año¹¹ (Ocupación de área agricultura, Ocupación de área urbana, Transformación de área natural, Ecotoxicidad terrestre, Eutrofización marina, Eutrofización de agua dulce, Acidificación territorial). [58]

4.3.2 Análisis de inventario

El análisis de inventario se construye para comparar impactos ambientales de los diferentes escenarios en los mismos límites. Los impactos de cada escenario son la suma de los impactos generados en cada uno de los procesos.

Los datos utilizados para la realización del ACV del escenario 0 fueron tomados de fuentes primarias en caso de que la información estuviese disponible, de lo contrario, se hizo uso de información secundaria tanto de documentos así como la base de datos de Ecoinvent v 3.0 que contiene datos de materias primas, producción de energía, productos químicos, combustible como se muestra en la *Tabla 10* con sus nombres o su análogo en el software que maneja por defecto el idioma inglés, adicional a esto es importante tener en cuenta que el software analiza el todo el ciclo de vida de los insumos, lo que interviene directamente en los resultados.

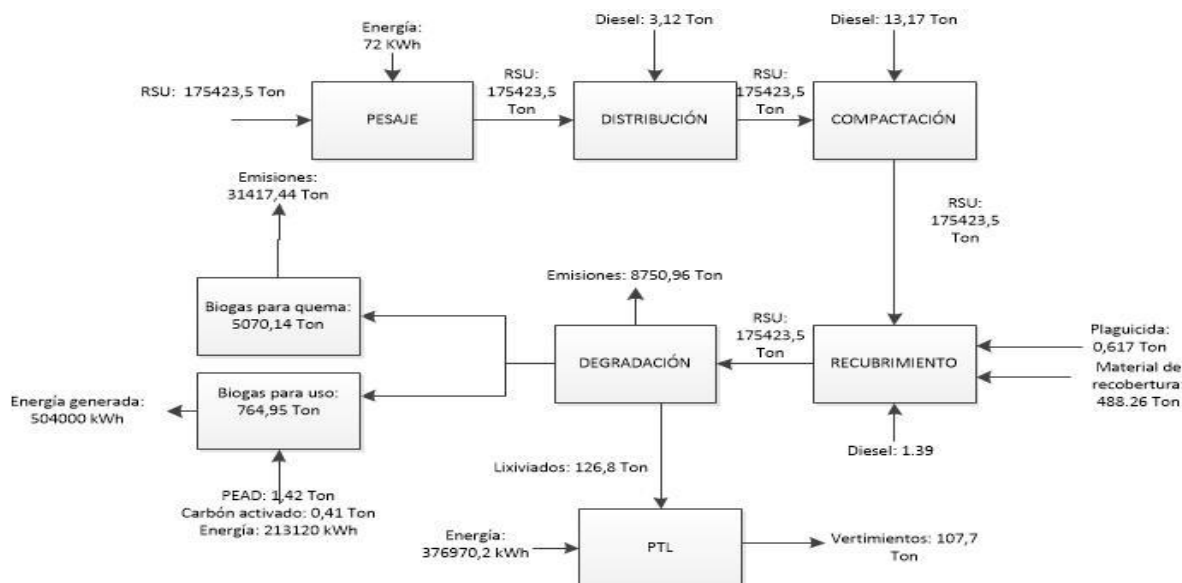
⁹ DALY- indicador que representa los días perdidos por discapacidad sus siglas en inglés Dissability Adjusted Life Year [35]

¹⁰ \$- Indicador que representa el costo extra involucrados en futuras extracción de recursos [35]

¹¹ Especies/año- Indicador que representa las especies perdidas por año [35]

Los datos de masa recolectados durante todo el proceso fueron tratados mediante factores de conversión que llevan los datos a la unidad funcional, que para el caso de estudio corresponde a Ton/mes; en el caso de los datos de energía la unidad fue ingresada en KWh/mes (para ver esta conversión Ver Anexo 1). Los datos fueron representados en un diagrama de cuantificación de flujos como se muestra en la Figura 7.

Figura 7: Cuantificación de flujos del relleno sanitario Doña Juana



Fuente: autores

La evaluación inicia a partir del ingreso del camión recolector hasta el sitio de descargue, durante este trayecto los residuos se pesan como primera instancia para luego ser distribuidos en las zonas de disposición, donde son compactados mediante el uso de maquinaria pesada para reducir su volumen. Una vez se completa la capacidad de la zona se recubren con arcilla y tierra negra; continuando así su proceso de degradación cuyos productos finales son lixiviados y biogás. Los lixiviados por su parte son llevados a una planta de tratamiento de lixiviados (PTL) con el fin de reducir la carga contaminante, generando lodos que son deshidratados para reducir su volumen mediante una maquina centrifuga y por último ser enviados a relleno sanitario. Por otro lado, el tratamiento del biogás se divide en aprovechamiento (para recuperación energética) y quema (para mitigar la emisión de Gases Efecto Invernadero), el cual utiliza tubos de polietileno de alta densidad (PEAD) para la captación de biogás. (Ver Anexo 2)

Tabla 10: Inventario de ciclo de vida escenario 0- Relleno Sanitario Doña Juana

Relleno Sanitario Doña Juana		
	Dato	Fuente
Entradas		
Pesaje		
Electricity, low voltage {RoW}I Market for I Alloc Def, S (kWh)	72	[59]
Distribución		
Diesel (Ton)	3,112	[60]
Compactación		
Diesel (Ton) Compactadora vibratoria CB-214C	2,396	[61]
Diesel (Ton) Bulldozer D8	10,782	[61]
Recubrimiento		
Soil (Ton)	220,880	[41]
Clay, Bentonite (Ton)	267,380	[41]
Organophosphorous compound, unspecified {GLO} I Market for I Alloc Def, S (Ton)	0,617	[62] [41]
Diesel (Ton)	1,397	[61]
Planta de lixiviados		
Electricity, low voltage {RoW}I Market for I Alloc Def, S (kWh)	352.800	[41]
Electricity, medium voltage {RoW}I Market for I Alloc Def, S (kWh)	24.170,2	[63]
Deshidratación de lodos		
Electricity, low voltage {RoW}I Market for I Alloc Def, S (kWh)	16.113,6	[63]
Electricity, medium voltage {RoW}I Market for I Alloc Def, S (kWh)	43.200	[64]
Biogas para uso		
Activated Carbon, at plant/RER mass	0,416	[65]
Polyethylen, high density, granulate {RoW}I production I Alloc Def, S	1,423	
Electricity, medium voltage {RoW}I Market for I Alloc Def, S (kWh)	4.320	
Electricity, medium voltage {RoW}I Market for I Alloc Def, S (kWh)	64.800	
Electricity, medium voltage {RoW}I Market for I Alloc Def, S (kWh)	144.000	
Salidas		
Emisiones al aire		
Degradación		
Methane, biogenic (Ton)	3.983,990	[66]
Carbon Dioxide (Ton)	4.714,413	[66]
Nitrogen, atmospheric (Ton)	52,802	[66]
Quema		
Methane (Ton)	187,378	
Carbon Dioxide (Ton)	31.229,720	
Nitrogen dioxide (Ton)	0,359	

Relleno Sanitario Doña Juana		
	Dato	Fuente
Vertimientos		
Planta de lixiviados		
Aluminium	0,270	[36]
Arsemic	0,0008	[36]
Beryllium	0,0018	[36]
Cadmium	0,00036	[36]
Zinc	0,014	[36]
Cobalt	0,004	[36]
Copper	0,023	[36]
BOD5, Biological oxygen demand	106,729	[36]
Iron	0,701	[36]
Lithium	0,0033	[36]
Manganese	0,0069	[36]
Molybdenum	0,00095	[36]
Lead	0,0036	[36]
Nickel	0,0124	[36]
Deshidratación		
Municipal solid waste {RoW} I Treatment of, sanitary landfill I Alloc Def, S	189	

4.3.3 Evaluación del impacto de ciclo de vida (EICV)

La metodología del análisis de ciclo de vida (ACV) contempla la clasificación de categorías para evaluación de impactos mediante metodologías como ReCiPe Midpoint [35], Impact 2002+, CML-IA [26], entre otros. Para el caso de estudio se escogió la metodología ReCiPe MidPoint H/A para todos los escenarios, dado que contiene las categorías más significativas para la disposición de RSU. De manera complementaria se realizó una revisión bibliográfica en donde utilizan la metodología Endpoint para visualizar gráficamente la afectación a las tres áreas de protección (Salud humana, Ecosistemas y Recursos), las categorías más significativas para el estudio son las representadas en la *Tabla 11*.

Tabla 11: Categoría de impacto seleccionada

Categoría	Definición	Puntos finales	Indicador
Agotamiento de la capa ozono	Es el resultado de una serie de emisiones de compuestos halocarbonados (CFC) que pueden producir un aumento de concentraciones de bromo y cloro en la estratósfera causando reducción de ozono estratosférico. [67]	Halon 1301, CFC-10	Kg CFC -11 eq
Cambio Climático (salud humana, ecosistemas)	Los gases de efecto invernadero al quedar retenidos en la atmósfera no permiten la salida de la radiación, desencadenando impactos relacionados al incremento en la temperatura global, cambios en la precipitación, aumentos en el nivel del mar. [33]	CH ₄ , CO ₂ biogenico, CO ₂ fósil	Kg CO ₂ eq
Formación de oxidantes fotoquímicos	La formación de oxidantes fotoquímicos se refiere a un fenómeno que ocurre bajo ciertas condiciones atmosféricas de temperatura y presión, que produce reacciones formando contaminantes con mayor potencial de peligrosidad. [68]	CH ₄ , NO _x	Kg NMVOC
Formación de partículas	Se refiere a la emisión de contaminantes como NO _x , NH ₃ , SO ₂ o PM _{2.5} que reaccionan en la atmósfera formando aerosoles secundarios, que al ser inhalados inciden en la salud humana. [35]	Aire- SO _x , Aire- PM _{2.5} , Aire- NO _x	Kg PM ₁₀ eq
Eutrofización de agua dulce	La eutrofización de agua dulce ocurre debido a la descarga de nutrientes a cuerpos de agua dulce, aumentando la concentración de nutrientes en el agua, produciendo el incremento excesivo de especies autótrofas. [69]	Fosfato	Kg P eq
Toxicidad humana	Es un índice que refleja el daño potencial de una unidad de contaminantes como arsénico, dicromato de sodios y fluoruro, entre otros. Presentes principalmente en la producción de energía y afectan la salud humana por inhalación, ingestión y contacto. [70]	Arsénico, Manganeseo	Kg 1,4-DB ¹² eq
Acidificación terrestre	La acidificación terrestre se caracteriza por la deposición de contaminantes acidificantes que al situarse en el suelo	Aire- SO _x , Aire- NO _x	Kg SO ₂ eq

¹² DB- dichlorobenzene

Categoría	Definición	Puntos finales	Indicador
	provocan la caída del pH y pérdida de fertilidad. [71]		
Agotamiento fósil	Evalúa el agotamiento de recursos fósiles, mediante el análisis del aumento en el costo de extracción de estos recursos debido a su agotamiento. [72]	Carbón, Crudo	Kg Oil eq

Fuente: autores

A continuación, en la sección de contribución se resalta el proceso que mayor aporte tuvo en los resultados de las categorías de impacto sin tener en cuenta la recuperación energética perteneciente a la planta de Biogás. (Ver Tabla 12). Para el análisis se generaron gráficos en donde los impactos negativos se representan con barras que están por encima del eje X y los impactos positivos serán los representados por debajo del eje X, haciendo referencia a lo que se deja de emitir que en el software se manejan como productos evitados.

Tabla 12: Resultados Escenario 0 categoría de impacto por proceso

Categoría de impacto	Unidad	MR*	EQB*	PTL*	EP*	ED*	DL*	D*	EC*	CA*
Cambio Climático	kg CO ₂ eq	7,67E+03	3,54E+07	2,70E+05	5,16E+01	1,94E+03	4,12E+04	9,36E+07	8,23E+03	1,13E+04
Agotamiento capa de ozono	kg CFC-11 eq	8,36E-03	----	3,59E-02	6,88E-06	1,59E-02	5,52E-03	----	6,74E-02	1,51E-03
Acidificación terrestre	kg SO ₂ eq	7,95E+01	----	1,53E+03	2,93E-01	1,32E+01	2,34E+02	----	5,60E+01	6,44E+01
Eutrofización de agua dulce	kg P eq	9,37E+00	----	9,54E+01	1,83E-02	1,31E-02	1,43E+01	----	5,55E-02	4,02E+00
Toxicidad Humana	kg 1,4-DB eq	2,54E+03	----	1,31E+05	2,12E+01	3,00E+02	1,59E+04	----	1,27E+03	4,66E+03
Formación de oxidantes Fotoquímicos	kg NMVOC	5,90E+01	1,89E+03	9,23E+02	1,77E-01	3,60E+01	1,42E+02	4,02E+04	1,52E+02	3,88E+01
Formación de partículas	kg PM10 eq	2,62E+01	----	5,77E+02	1,10E-01	4,31E+00	8,86E+01	----	1,83E+01	2,42E+01
Ecotoxicidad de agua dulce	kg 1,4-DB eq	8,79E+01	----	2,67E+04	1,66E+00	3,06E+00	7,49E+02	----	1,30E+01	3,64E+02
Agotamiento Fósil	kg oil eq	4,00E+03	----	8,38E+04	1,61E+01	3,70E+03	1,28E+04	----	1,57E+04	3,53E+03

*MR- Material de recubrimiento; EQB- Emisiones Quema Biogás; PTL- Planta de tratamiento de lixiviados; EP- Energía pesaje; ED- Energía distribución; DL- Deshidratación de lodos; D- Emisiones de degradación; EC- Energía compactación; CA- Material recuperado centro de acopio

Fuente: Simapro

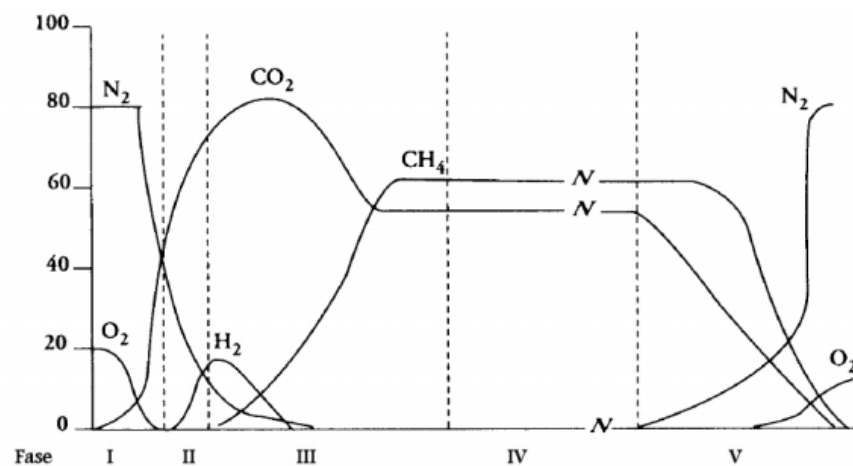
Para la categoría de impacto de cambio climático por las Toneladas de Residuo sólido urbano que entran a relleno sanitario se generan 1,29E4 Ton CO₂ eq, donde la mayor contribución se presenta en las emisiones de degradación y de la quema de biogás (*Figura 12*), debido a que dentro de estas emisiones se encuentra en mayor porcentaje el metano (CH₄) y el CO₂, con aproximadamente 3.983, 99 Ton CH₄/mes y 4.714,417 Ton CO₂/mes respectivamente. Estos dos gases pertenecen al grupo de gases de efecto invernadero potenciadores del calentamiento global y son los mayores aportantes a la categoría de cambio climático (Ver *Tabla 11*).

Las emisiones del proceso de degradación se emiten indirectamente, debido a que los gases de este proceso se producen por la descomposición de la materia orgánica que ha sido sepultada en las celdas de disposición. Los gases de este proceso se capturan mediante un sistema de bombeo y son dirigidos a la planta de Biogás para su aprovechamiento. Es del caso mencionar que esta captura no es completamente efectiva, dado que se documenta que aproximadamente el 60% de estos gases entre los cuales se destacan el CH_4 y el CO_2 se escapan a la atmósfera por medio de infiltración, es por esto que este proceso genera un mayor aporte a la categoría de cambio climático. [73]

La generación de gases en un relleno sanitario se compone de cinco fases (I- Aeróbica, II- Transición, III- Anaeróbica, IV- Metanogénesis, V- Estabilización). En la fase I se presenta la degradación de sustancias por la presencia de oxígeno, propiciando la formación de CO_2 , H_2O y materia parcialmente descompuesta. En la fase II se presenta un ambiente en condiciones anaeróbicas en el que actúan organismos facultativos con la producción de ácidos orgánicos liberando metales en el agua y generando CO_2 . Posteriormente ocurre la formación de metano (CH_4) mediante la acción de organismos que en el ambiente adecuado actúan lentamente para su producción, por lo contrario se reduce la formación de CO_2 . [66] (Ver Figura 8).

Durante la metanogénesis se da el momento en el que se registra la producción más alta de metano, alcanzando un porcentaje máximo de 60% en volumen. Por último, se presenta la fase de estabilización en donde se reduce la producción de metano y la conversión a un ambiente aerobio por la presencia de aire atmosférico. [66]

Figura 8: Fases descomposición de los residuos sólidos en relleno sanitario



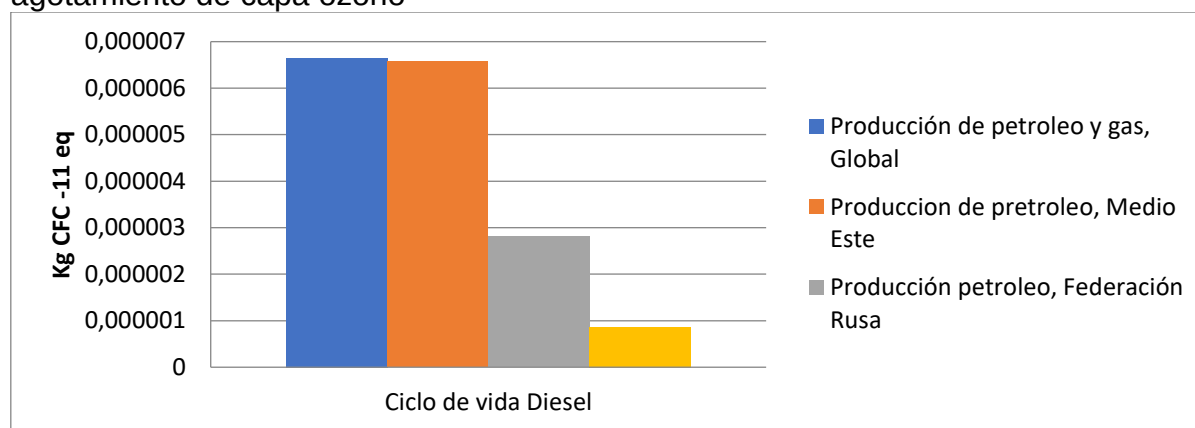
Fuente: [74]

Es importante resaltar que el CH₄ y el CO₂ son gases que se emiten continuamente durante un periodo de tiempo, así se finalice la disposición de los RSU en celdas, es por esto que una vez clausurado el relleno sanitario doña Juana (RSDJ), la planta de Biogás seguirá operando; sin embargo como existen perdidas por infiltración cerca de un 60% la categoría de cambio climático será la más representativa en el proceso de degradación de RSU; ya que el metano es el segundo mayor contribuyente al calentamiento global. Dado que su potencial de calentamiento es según estudios es 21 veces mayor que el CO₂, pues se asocia con la generación de ozono troposférico y aumento de tiempo de residencia de algunos COV [75].

Para la categoría de impacto del Agotamiento de la capa de ozono, por las toneladas de Residuos sólidos urbanos que ingresan a relleno sanitario se generan 0,135 kg CFC -11 eq. El impacto de esta categoría se puede evidenciar en mayor medida en los procesos de compactación y distribución por el consumo de Diesel de 16,29 Ton/mes en la maquinaria pesada (Bulldozer D8, compactadora 8-26). Sin embargo, es importante aclarar que por defecto el sistema se evalúa la producción, distribución y consumo del combustible, por lo que es un impacto directamente relacionado con el proceso productivo del Diesel mas no al proceso evaluado en el presente proyecto (Escenario 0).

Otra de las razones por la que el Diesel es asociado al agotamiento de la capa de ozono, es porque la base de datos Ecoinvent incluye emisiones al aire entre las más destacadas Metano bromotrifluoruro, metano clorodifluoruro, metano bromodifluoruro, destacados como los más significativos dado que su factor de aporte a la categoría es 12, 6 y 6 kg CFC eq/ kg de componente emitido respectivamente [76]. (Ver Figura 9).

Figura 9: Contribución de procesos en la cadena del Diesel en la categoria de agotamiento de capa ozono



Fuente: Autores a partir de los resultados de Simapro

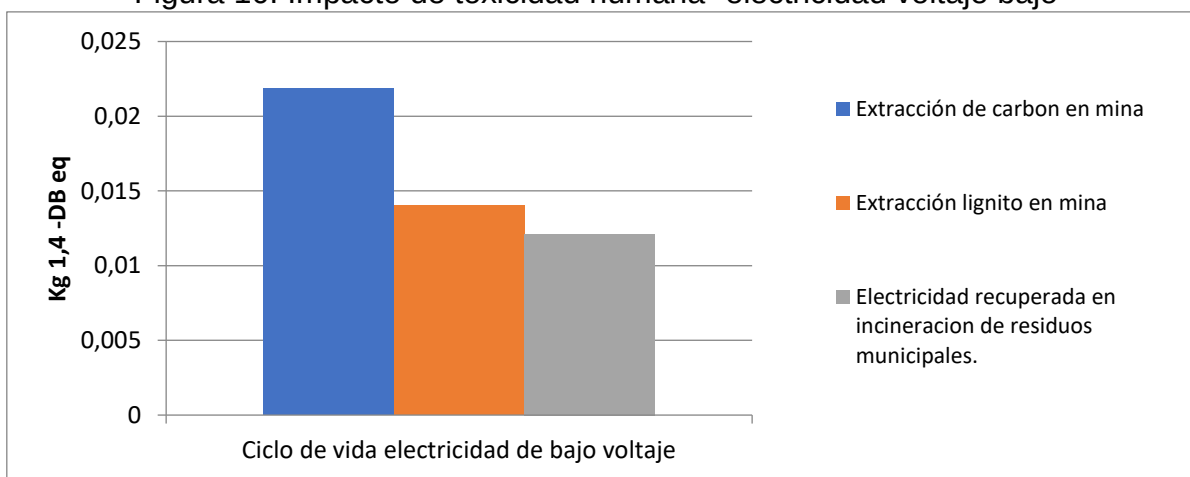
En la categoría de impacto de toxicidad humana por las toneladas de RSU que ingresan al relleno se generan 2,15E5 Kg 1,4 DB eq, en donde el mayor aporte se da en la planta de lixiviados debido a dos flujos del proceso (consumo de energía eléctrico y generación de vertimientos). Para el consumo de energía eléctrica de bajo voltaje el software simapro maneja por defecto etapas asociadas a las tipologías de generación de energía eléctrica a partir de fuentes fósiles (Ver Figura 10). En el segundo caso relacionado a la generación de vertimientos que se muestran en la *Tabla 13* junto con su factor de caracterización respectivo, el cual proporciona una representación cuantitativa de la importancia para la categoría de impacto [72].

Tabla 13: Factores de aporte a la categoría de toxicidad humana

Compuesto/Entrada	Cantidad (Kg/mes)	Factor (Kg DB eq/Kg compuesto)
Cadmio	0,36	122
Manganeso	6,95	700
Plomo	3,66	220
Niquel	12,45	6,9
Molibdeno	0,95	1300
Zinc	14,137	36,2

Fuente: Autores

Figura 10: Impacto de toxicidad humana- electricidad voltaje bajo



Fuente: Autores a partir de los resultados de Simapro

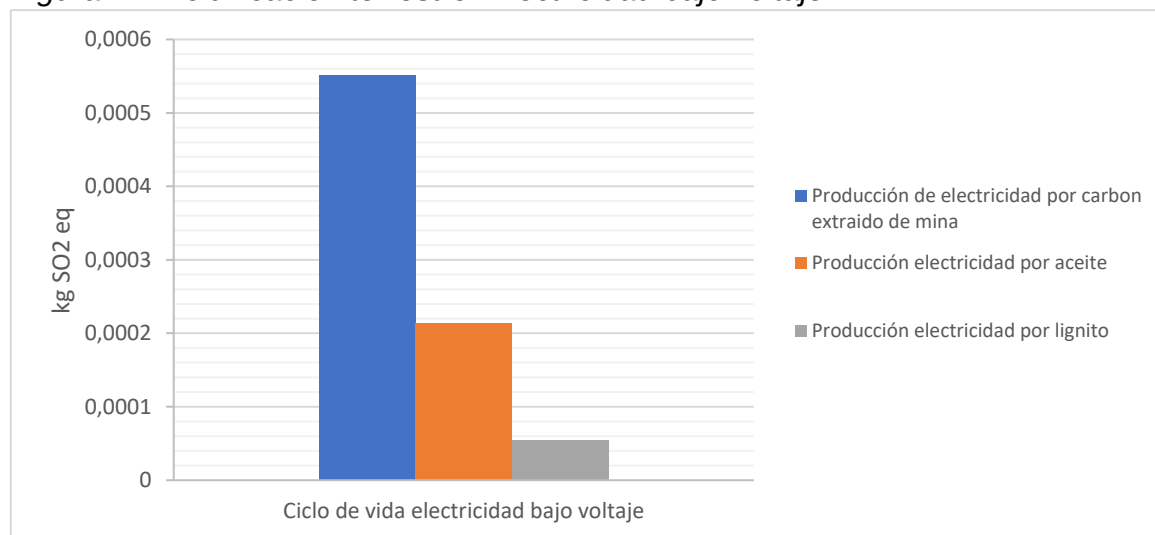
En la categoría de impacto de formación de oxidantes fotoquímicos las Toneladas de RSU dispuesta se generan 4,4E4 kg NMVOC el aporte casi total es debido al proceso de degradación, por la emisión de Metano de aproximadamente 3.983,9 Ton/mes, el cual al estar en la atmosfera propicia las condiciones para generación

de ozono troposférico y disminución en el radical hidroxilo, el cual es muy reactivo en la atmosfera produciendo reacciones con los GEI [77] [66].

En la categoría de impacto de formación de partículas por las toneladas de RSU que entran al relleno se generan 1,06E3 Kg PM₁₀eq. Este impacto se evidencia por el consumo de electricidad dado que dentro de la base de datos ecoinvent se tiene como emisión PM₁₀, PM_{<2,5} y amonio, los cuales contribuyen a esta categoría. Es importante resaltar que estos contaminantes son generados en la etapa productiva de la electricidad basada en derivados del carbón mineral.

En la categoría de impacto de acidificación terrestre por las toneladas que entran al sistema se generan 2,82E2 Kg SO₂ eq. Este impacto se evidencia por el consumo de energía debido a que dentro de la base de datos ecoinvent se tiene como salida dióxidos de sulfuro y dióxidos de nitrógeno, resultado de toda la cadena de producción especialmente en las minas (Ver Figura 11), los cuales contribuyen a esta categoría.

Figura 11: Acidificación terrestre- Electricidad bajo voltaje



Fuente: Autores a partir de los resultados de Simapro

En la categoría de impacto de ecotoxicidad de agua dulce por cada tonelada de RSU dispuesta se generan 2,98E4 Kg 1,4DB eq en donde el mayor aporte se da en la planta de lixiviados debido al contenido de los contaminantes mostrados en la *Tabla 14*, en donde se puede ver que el mayor factor de caracterización pertenece al cobre, sin embargo esto no es evidencia de que es el cobre sea el contaminante que más afecta a la calidad del recurso, lo que incide en mayor medida es la cantidad de contaminante generada en la descarga que para el caso de estudio es el Cobalto.

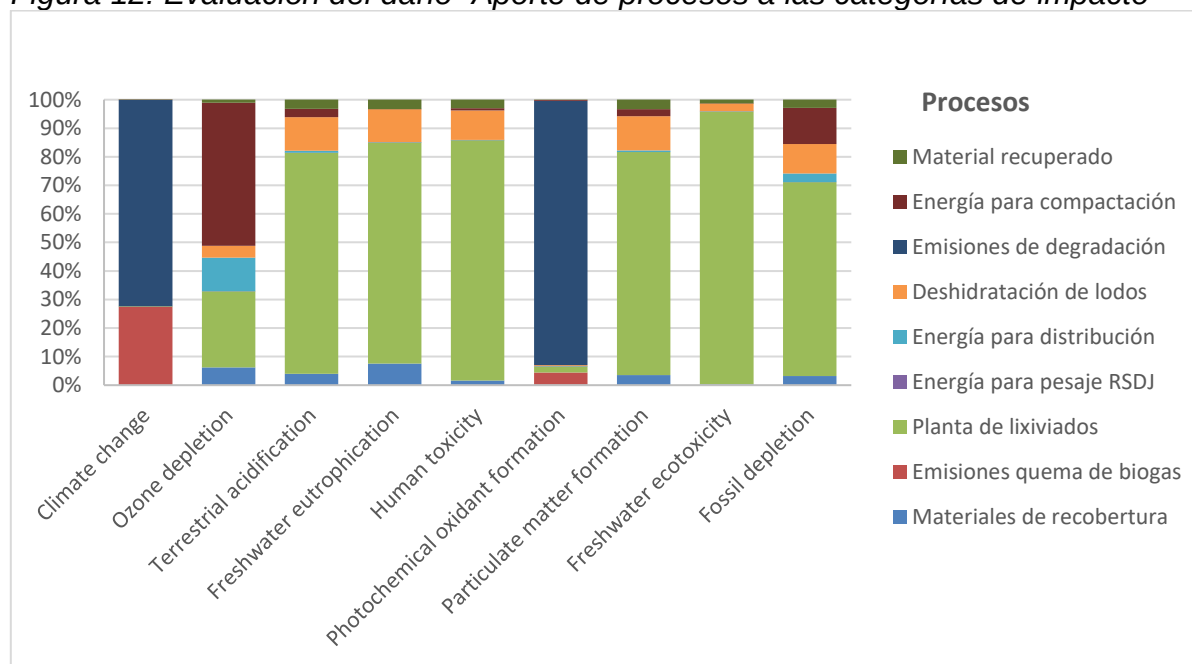
Tabla 14: Factor caracterización ecotoxicidad de agua dulce

Compuesto/Entrada	Cantidad (Ton/mes)	Factor (Kg 1,4 DB-eq/ Kg de compuesto)
Cadmio	0,36	9,05
Niquel	12,45	98,4
Cobre	23,51	118
Cobalto	406,53	33
Arsénico	0,878	15,6

Fuente: Autores

Finalmente en la categoría de agotamiento de fuentes fósiles se generan 1,24E5 Kg de Oil eq por las toneladas de RSU dispuestas , en la *Figura 12* se puede observar que los 3 procesos que más aportan en esta categoría son planta de lixiviados, energía compactación y deshidratación de lodos, los cuales tienen el consumo de energía eléctrica como un común denominador en sus flujos de proceso , lo cual incide directamente en esta categoría dado a los proceso de producción que se incluyen en la base de datos.

Figura 12: Evaluación del daño- Aporte de procesos a las categorías de impacto

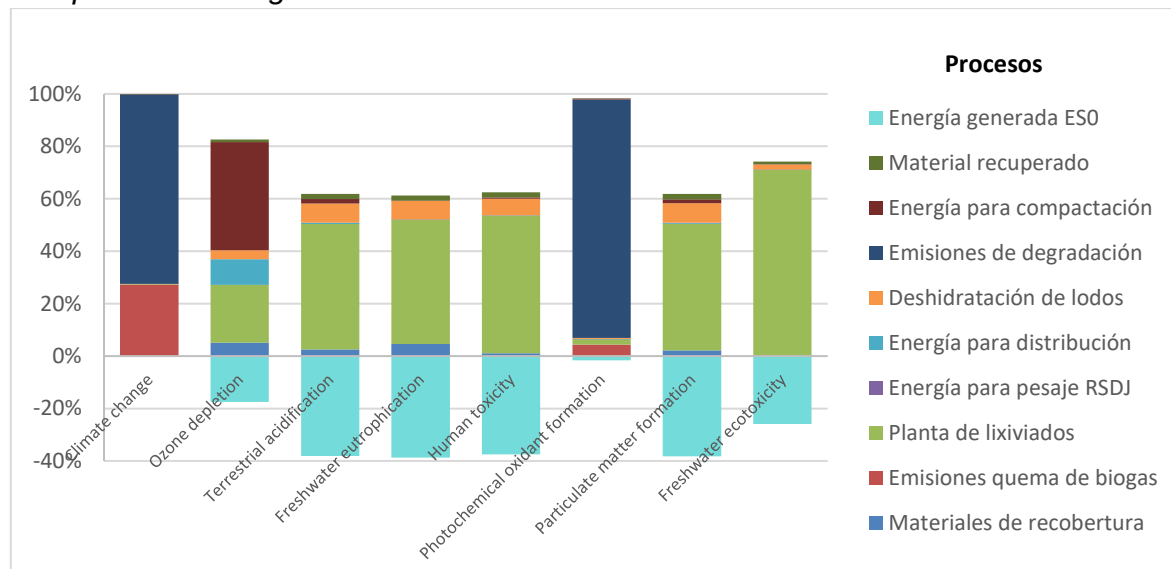


Fuente: Autores a partir de los resultados de Simapro

En la Figura 13 se evidencia el aporte de la operación del relleno sanitario a las categorías de impacto teniendo en cuenta la recuperación energética dentro de la planta de Biogás, se pueden ver impactos positivos en la mayoría de las categorías dado que se evitan emitir contaminantes a la atmósfera haciendo uso y

aprovechamiento de los gases para fines energéticos contrario a lo que sucede en la Figura 12 cuyos contaminantes no están siendo tratados con fines de recuperación energética.

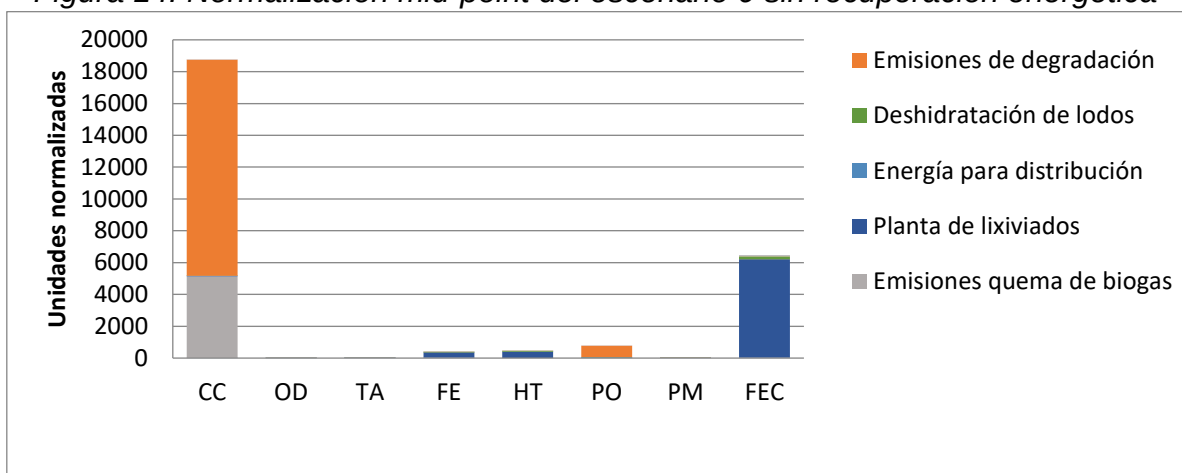
Figura 13: Caracterización- Aporte de procesos a las categorías de impacto con recuperación energética



Fuente: Autores a partir de los resultados de Simapro

Siguiendo los lineamientos establecidos en el marco metodológico se muestra en la Figura 14 la normalización del escenario 0, permitiendo el análisis global al llevar todas las categorías a una misma unidad denominada valor normalizado. Los resultados más relevantes se presentan en las categorías de Cambio climático y Ecotoxicidad de agua dulce, el resto de las categorías tienen un valor poco significativo, por lo que se excluyen del siguiente análisis.

Figura 14: Normalización mid-point del escenario 0 sin recuperación energética

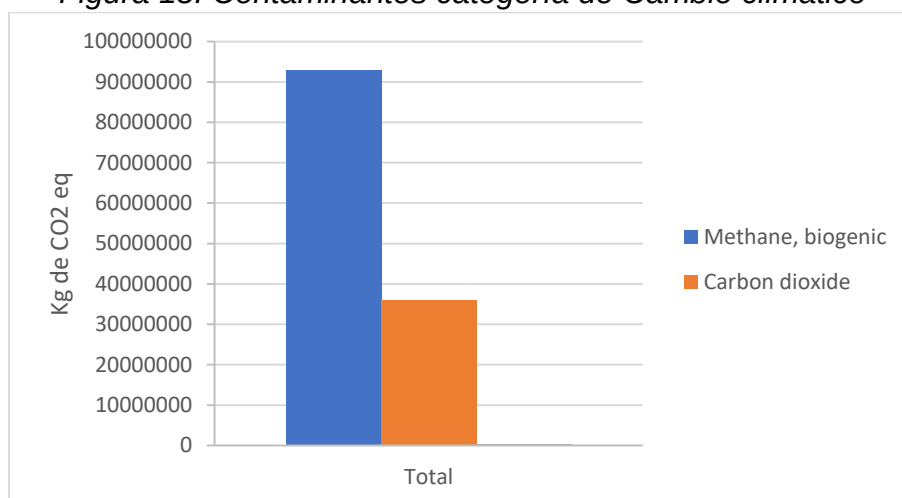


Fuente: Autores a partir de los resultados de Simapro

*CC-Climate Change, OD- Ozone Depletion, TA- Terrestrial acidification, FE- Freshwater eutrophication, HT- Human Toxicity, PO- Photochemical Oxidant Formation, PM- Particulate Matter Formation, FEC- Freshwater ecotoxicity

Para mejor comprensión del análisis de los contaminantes que predominan en la categoría de cambio climático *Figura 15*, el dióxido de carbono y el metano especialmente predominan en la categoría de cambio climático, los cuales podrían contribuir al aumento de la temperatura global; desencadenando problemas asociados a derretimiento de polos producto del aumento en el nivel del océano y por ende cambio en los ecosistemas.

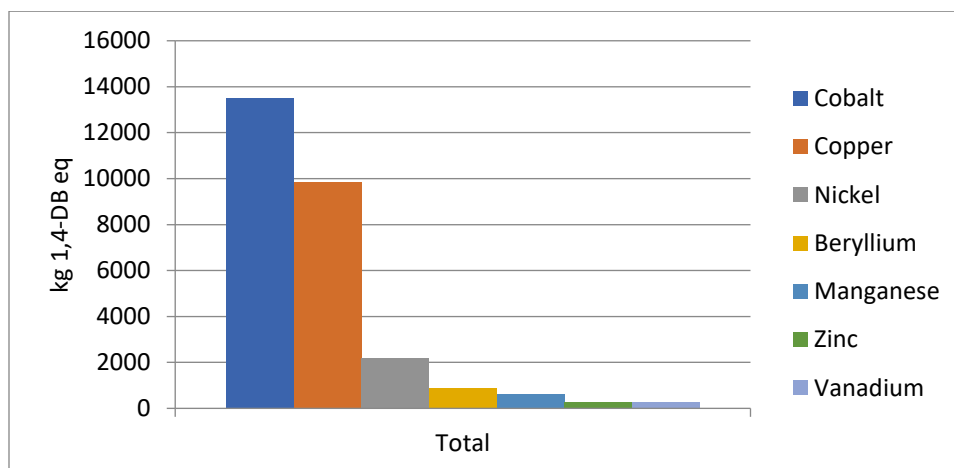
Figura 15: Contaminantes categoría de Cambio climático



Fuente: Autores a partir de los resultados de Simapro

Para la categoría de ecotoxicidad de agua dulce se muestra la *Figura 16* en donde los contaminantes que predominan son el Cobre, el cobalto y níquel, los cuales son emitidos en menor proporción por el tratamiento que se da en la planta de lixiviados, al no ser un procedimiento 100% efectivo siguen vertiéndose este tipo de contaminantes a las fuentes hídricas, generando hipoxia propiciando la muerte de especies [78].

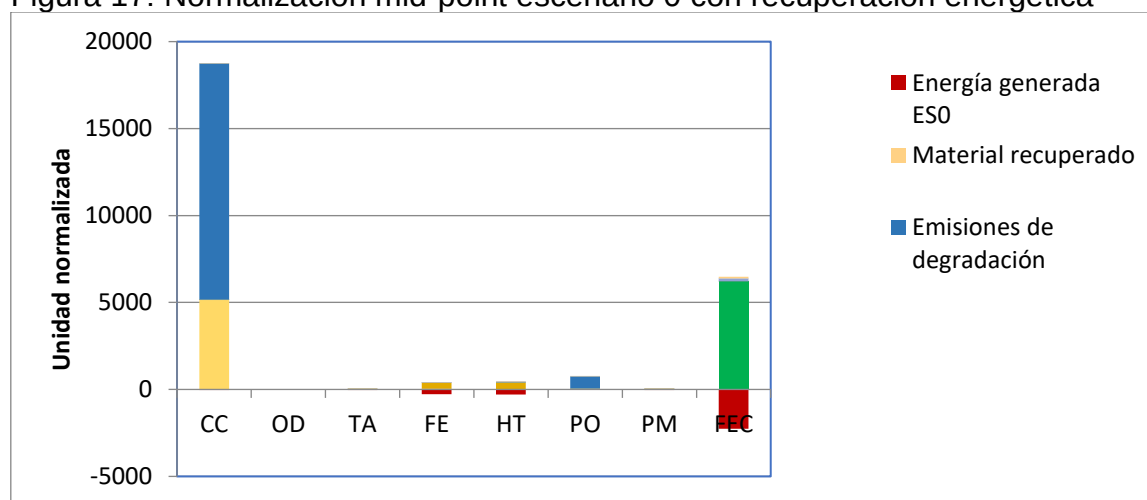
Figura 16: Contaminantes categoría de Ecotoxicidad de agua dulce



Fuente: Autores a partir de los resultados de Simapro

En la Figura 17 se muestra la normalización para el escenario 0 con recuperación energética, al igual que la Figura 14 las categorías más relevantes son el cambio climático y ecotoxicidad de agua dulce; sin embargo, se evidencia un impacto positivo en la segunda categoría producto del aprovechamiento energético de la planta de biogás.

Figura 17: Normalización mid-point escenario 0 con recuperación energética



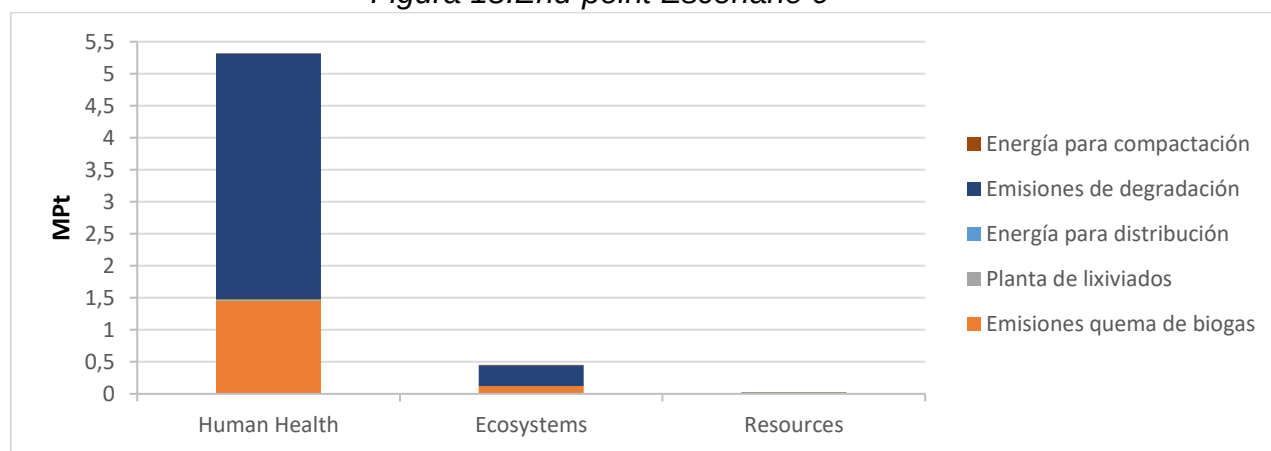
Fuente: Autores a partir de los resultados de Simapro

*CC-Climate Change, OD- Ozone Depletion, TA- Terrestrial acidification, FE- Freshwater eutrophication, HT- Human Toxicity, PO- Photochemical Oxidant Formation, PM- Particulate Matter Formation, FEC- Freshwater ecotoxicity

En la *Figura 18* se muestra la evaluación end-point del escenario 0, con el fin de observar el daño generado a la salud humana, los ecosistemas y los recursos partiendo de las categorías mid-point anteriormente analizadas. La categoría más afectada fue la salud humana al estar directamente relacionada con el cambio climático, el cual tuvo en la evaluación midpoint el resultado más significativo, producto de las emisiones de gases efecto invernadero (CH_4 y CO_2).

Para la categoría de daño de ecosistemas uno de los impactos asociados más representativos en este estudio fue la ecotoxicidad de agua dulce, generado por el vertimiento de lixiviados cuyo tratamiento no es 100% efectivo, con alta carga de componentes como Cadmio, Cobre, Arsénico, Manganeseo, entre otros. Por último, la categoría de daño de recursos no muestra un aporte significativo inferior a 0,5 MPt (Milipuntos), en comparación con las otras dos áreas dado a que los impactos como agotamiento de fuentes fósiles no tuvieron un gran puntaje en la evaluación midpoint.

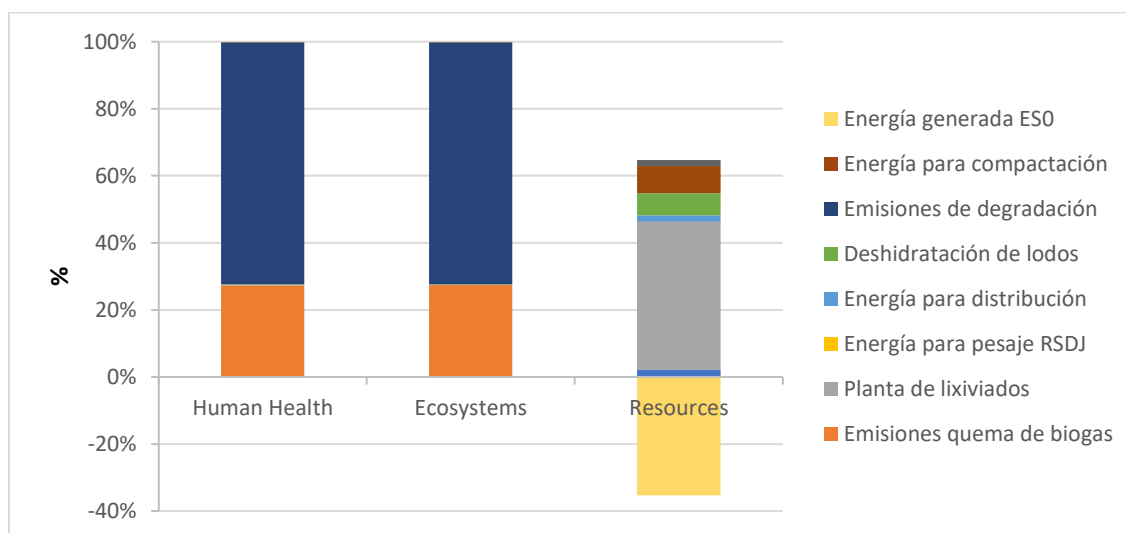
Figura 18: End-point Escenario 0



Fuente: Autores a partir de los resultados de Simapro

Al igual que la *Figura 18* se muestra la evaluación end-point con la diferencia de que se incluye recuperación energética en el análisis Ver *Figura 19*, generándose un impacto positivo en la categoría de recursos, dado que al generarse una recuperación energética como producto evitado se limita el uso de combustibles fósiles contribuyendo a un autoabastecimiento o distribución de la energía producida en la planta de biogás.

Figura 19: Evaluación Endpoint escenario 0 con recuperación energética



Fuente: Autores a partir de los resultados de Simapro

4.4 Análisis de ciclo de vida de los escenarios

A continuación, se presenta el análisis de resultados obtenidos en el desarrollo de la metodología descrita en el capítulo 2. En donde se presentan las cuatro fases del análisis de ciclo de vida de los escenarios 0,1 y 2 (Límites del sistema, Análisis de inventario de ciclo de vida, Evaluación de impacto y su interpretación y por último análisis de sensibilidad). Para observar todos los factores que intervienen en la disposición final de RSU en los escenarios se evalúa la recuperación energética en el tratamiento térmico y planta de Biogás de la incineración y relleno sanitario respectivamente.

4.4.1 Límites del sistema

Para realizar el análisis de los escenarios se establecieron los mismos límites para el escenario 1 y 2 siguiendo los mismos lineamientos del escenario 0 manejando la misma unidad funcional, alcance y metodología de evaluación, esto con el fin de comparar resultados. (Ver Figura 6)

4.4.2 Fase 2: Evaluación del inventario de ciclo de vida

Escenario 1: Separación, Relleno, Incineración

Para los datos utilizados en la realización del ICV de la tecnología de incineración (Ver Tabla 16). Fue necesaria la revisión bibliográfica internacional de casos de estudio de un ACV de dicha tecnología, encontrando que en la ciudad de Cantabria, España se hizo un ACV para la planta de incineración de RSU de la ciudad; así mismo se encontró que la composición de los residuos sólidos urbanos, más

específicamente la fracción orgánica se asemeja a la de Bogotá siendo esta la más representativa respecto al poder calorífico [79].

Tabla 15: Composición RSU Cantabria

Fracción	Porcentaje
Materia orgánica	59,7%
Vidrio	8,2%
Papel y cartón	17,3%
Envases	14,8

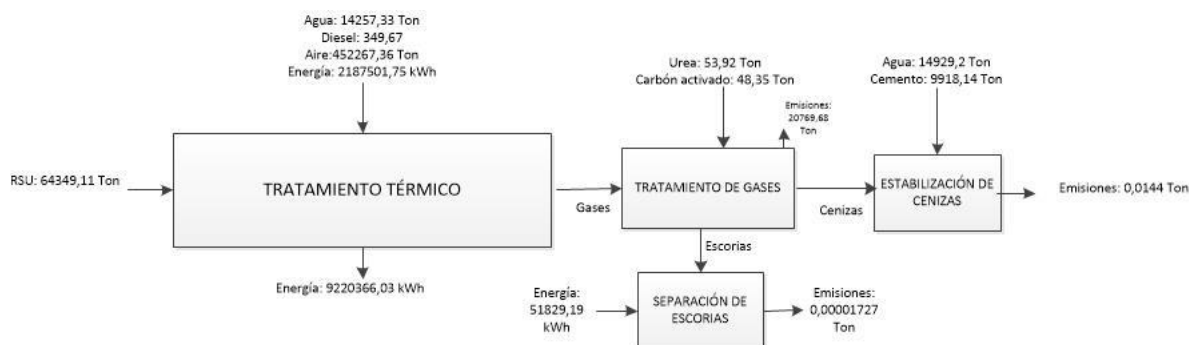
Fuente: [80]

Para efectos de la evaluación de ACV del presente proyecto se combinaron las tecnologías relleno sanitario e incineración con porcentajes de 50% y 35%, respectivamente de un total de 183.854,61 Ton RSU/mes; con el fin de aumentar la separación de un 4,5% a 15% se trabajó con datos de una planta de separación mecanizada que tiene una mayor capacidad [46]. Dado que los porcentajes para las tecnologías variaron al ser combinados se presenta el inventario con datos actualizados en anexo 4.

Los datos recolectados de las operaciones de todo el proceso fueron convertidos a la misma unidad funcional, para el caso de estudio Ton/mes exceptuando los datos de energía cuya unidad fue ingresada en el software KWh/mes. (Ver Anexo 4). Los datos fueron representados en un diagrama de cuantificación de flujos como se muestra en la Figura 20.

Para la separación de los RSU se utiliza una planta mecanizada que opera mediante dos etapas, en primer lugar, se separan los residuos no ferrosos con una criba rotativa trommel y posteriormente se separan los metales por la acción de la fuerza magnética. Seguido a esto se continuará con la separación manual de los residuos resultantes de las etapas anteriores [81].

Figura 20: Cuantificación de flujos.



Fuente: Autores

La evaluación de la incineración se limita a analizar desde el tratamiento térmico hasta la separación magnética de escorias, incluyendo el tratamiento de gases y estabilización de cenizas. En esta planta los RSU son sometidos a un proceso de combustión donde se convierten los residuos en gases, cenizas y escorias. Durante la combustión se genera vapor, el cual se usa para producir energía eléctrica. Por otro lado, los gases que no son aprovechados se someten a una limpieza, las cenizas son estabilizadas con cemento y agua para ser dispuestas en relleno sanitario; a diferencia de las escorias son separadas mangánicamente obteniendo escoria inerte. [79] (Ver Anexo 4)

Tabla 16: Inventario de ciclo de vida de planta incineradora

Incineración		
	Dato	Fuente
Entradas		
Tratamiento térmico		
Diesel (Ton)	21,95	[79]
Tap water {RoW} I market for I Alloc Def, S	14.257,33	[79]
Air (Ton)	452.267,36	[79]
Electricity, high voltage {RoW}I Market for I Alloc Def, S (kWh)	2.187.501,75	[79]
Tratamiento de gases		
Urea, as N {GLO} I Market for I Alloc Def, S (Ton)	53,92	[79]
Activated Carbon, at plant / RER mass (Ton)	48,351	[79]
Estabilización de ceniza		
Tap water {RoW} I market for I Alloc Def, S	14.929,2	[79]
Cement, unspecified {RoW} I Production I Alloc Def, S (Ton)	9.918,14	[79]
Separación magnética de escorias		
Electricity, low voltage {RoW}I Market for I Alloc Def, S (kWh)	51.829,19	[79]
Salidas		

Incineración		
	Dato	Fuente
Emisiones al aire		
Tratamiento de gases		
Carbon dioxide (Ton)	20.704,12	[79]
Nickel (Ton)	0,00235	[79]
Antimony (Ton)	0,00382	[79]
Arsenic (Ton)	0,00101	[79]
Cadmium (Ton)	0,0021	[79]
Chloride (Ton)	2,231	[79]
Chromium (Ton)	0,00163	[79]
Copper (Ton)	0,00619	[79]
Manganese (Ton)	0,00251	[79]
Mercury (Ton)	0,00038	[79]
Ammonia (Ton)	1,425	[79]
Fluoride (Ton)	0,086	[79]
Sulfur oxides (Ton)	1,053	[79]
Zinc (Ton)	0,0148	[79]
Hazardous Air Pollutants (HAP) (Ton)	0,0031	[79]
Nitrogen oxides (Ton)	55,78	[79]
Lead (Ton)	0,0223	[79]
Thallium (Ton)	0,00202	[79]
Dioxins (unspec.) (Ton)	4,9218	[79]
Tratamiento de cenizas		
Aluminium	1,60E-05	[82]
Arsenic	2,03E-05	[82]
Barium	0,00053	[82]
Calcium	0,00011	[82]
Chloride	9,20E-06	[82]
Carbon monoxide	5,966E-06	[82]
Chromium	7,253E-06	[82]
Copper	0,00043	[82]
Iron	5,61E-06	[82]
Potassium	0,00264	[82]
Lanthanum	6,960E-06	[82]
Magnesium	9,631E-06	[82]
Manganese	0,000344	[82]
Molybdenum	1,193E-05	[82]
Sodium	0,00400	[82]
Nickel	4,37E-05	[82]
Phosphorous	0,00263	[82]

Incineración		
	Dato	Fuente
Lead	0,0025	[82]
Antimony	0,00061	[82]
Silicon	2,65E-05	[82]
Strontium	0,00027	[82]
Titanium	5,182E-06	[82]
Vanadium	5,07E-05	[82]
Zinc	7,15E-06	[82]
Zirconium	8,64E-05	[82]
Separación magnética de escorias		
Zinc	2,75E-06	[82]
Lead	5,16E-07	[82]
Chromium	1,37E-06	[82]
Barium	6,88E-06	[82]
Antimony	3,44E-08	[82]
Copper	1,37E-06	[82]
Vanadium	2,06E-06	[82]
Nickel	1,37E-06	[82]
Arsenic	2,06E-07	[82]
Cobalt	6,88E-07	[82]

Fuente: Elaboración propia

Escenario 2: Separación, Relleno Sanitario, Incineración y Compostaje

Los datos utilizados para la realización del ACV del escenario 2 fueron tomados de fuentes secundarias de las ciudades de Cantabria y Pensilvania [79] [83] donde las tecnologías han sido implementadas como se muestra en la *Tabla 17*. Para efectos de la evaluación de ACV del presente proyecto se combinaron tecnologías de separación, relleno, incineración y compostaje con porcentajes de 15%, 45%, 30% y 10% respectivamente de un total de 183.854,61 Ton RSU/mes. Dado que los porcentajes para las tecnologías variaron al ser combinados se presenta el inventario con datos actualizados en anexo 5.

Tabla 17: Inventario ciclo de vida de compostaje

Compostaje		
Entradas		
	Dato	Fuente
Abono		
Wood chips, wet, measured as dry mass {RoW} I wood chips production, softwood, at sawmillI Alloc Def,S	7.632	[83]
Diesel (kg)	31,511	[83]
Electricity, low voltage {RoW}I Market for I Alloc Def, S (kWh)	349.315	[83]
Salidas		
Methane, biogenic (Ton)	88,250	[83]
Dinitrogen Monoxide	0,303	[83]
Ammonia	23,901	[83]
VOC, Volatile Organic Compound	25,7396	[83]
Nitrogen Oxides	4,890	[83]

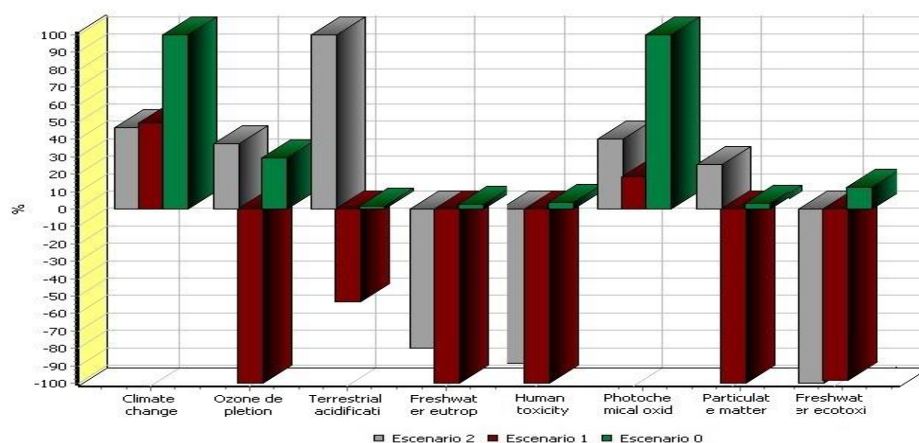
Fuente: Elaboración propia

4.4.3 Fase 3 y 4: Evaluación de ciclo de vida e interpretación

A continuación, se presenta el análisis de ciclo de vida para la comparación de escenario 0 (Relleno sanitario- separación en centro acopio), Escenario 1 (Relleno sanitario, incineración y separación) y Escenario 2 (Relleno Sanitario, incineración, compostaje y separación). Este análisis incluye una evaluación de desempeño de los escenarios con recuperación energética en las tecnologías de relleno sanitario e incineración.

En la *Figura 21* se muestra el aporte de cada escenario a las categorías de impacto. En la categoría de cambio climático el mayor impacto es generado por el escenario 0 con 1,2E8 Kg CO₂ eq debido al aporte mencionado en sección anterior. El resultado obtenido en los escenarios 1 y 2 se debe principalmente a dos procesos de la operación del relleno sanitario (emisiones de degradación y quema de biogás), seguido por el ciclo de vida del cemento usado para el proceso de estabilización de cenizas para la tecnología de incineración.

Figura 21: Evaluación de la contribución de los escenarios 0,1 y 2



Fuente: autores con Simapro

Para la categoría de agotamiento de la capa de ozono el mayor impacto se presenta para el escenario 2 con 0,37 Kg CFC-11 eq por tonelada de RSU ingresada a disposición, seguido por el escenario 0 con 0,365 KgCFC-11 eq. Este resultado se da por la presencia de Halon 1301 (metanobromotrifluoruro) en los procesos de distribución, compactación y abono, en donde opera maquinaria pesada que hace uso de refrigerantes que contienen este componente; de igual manera se incluye el proceso productivo de la generación de energía que según la base de datos de Ecoinvent también posee emisiones de este contaminante [84] .

Para el escenario 1 se evidencia una tendencia a impacto positivo de 0,365 Kg CFC-11 eq debido a la recuperación energética, es importante resaltar que aunque el escenario 2 también tenga una recuperación energética posee maquinaria cuyo consumo de combustible de 95,58 Kg Diesel/mes opaca los beneficios de la recuperación energética para esta categoría.

En el caso de la categoría de toxicidad humana se presentan impactos positivos asociados a los contaminantes en agua o aire que se dejan de emitir por la recuperación energética derivada del tratamiento térmico de los RSU en los escenarios 1 y 2. Caso contrario, el escenario 0 muestra que por las toneladas de RSU dispuestas se generan 1,56E5 Kg 1,4 DB eq, siendo este un impacto negativo derivado del proceso de producción de energía y operación de planta de lixiviados.

En adición, en la categoría de impacto de formación de oxidantes fotoquímicos hay una tendencia al daño ambiental por la emisión de contaminantes oxidantes como

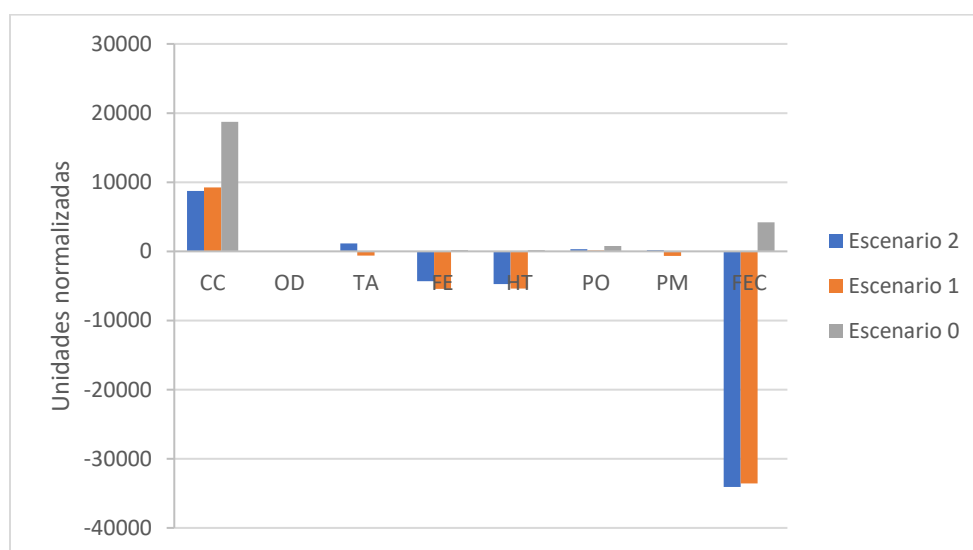
el metano, el cual es emitido en el proceso de degradación y quema de biogás del relleno sanitario.

En el caso del escenario 2 uno de los contaminantes que más aporta a la categoría de impacto de acidificación terrestre es el amonio, el cual contribuye a un resultado de 4,4E4 Kg SO₂ eq en esta categoría. El amonio es emitido en el proceso del compostaje propiciando una acidificación del suelo por la interacción del amonio atmosférico con compuestos azufrados y nitrogenados, los cuales aumentan el pH de la lluvia la cual se deposita en el suelo dañando sus propiedades físicas y químicas [85].

Finalmente, para la categoría de ecotoxicidad de agua dulce el escenario 0 muestra impactos negativos debido a la operación de la planta de lixiviados, en donde se generan vertimientos a las fuentes de agua dulce con Cobalto, cobre, níquel, afectando el equilibrio de las fuentes hídricas. Por el contrario, el escenario 1 y 2 muestran impactos positivos dado la recuperación energética evitando la emisión de contaminantes que afecten el equilibrio de los ecosistemas acuáticos (níquel, cobre, cobalto, manganeso, entre otros).

En la Figura 22 se muestra la normalización de los tres escenarios modelados en la metodología ReCiPe Midpoint mostrando que las categorías más relevantes son cambio climático, ecotoxicidad del agua y toxicidad humana al llevar todos los resultados a una misma unidad.

Figura 22: Normalización mid-point comparación escenarios



Fuente: Autores a partir de los resultados de Simapro

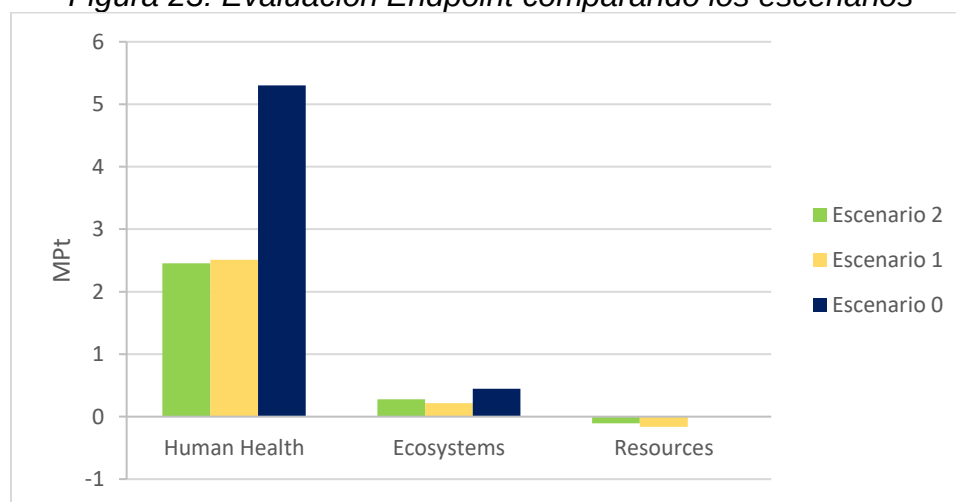
*CC-Climate Change, OD- Ozone Depletion, TA- Terrestrial acidification, FE- Freshwater eutrophication, HT- Human Toxicity, PO- Photochemical Oxidant Formation, PM- Particulate Matter Formation, FEC- Freshwater ecotoxicity

Dado que no se asumieron procesos de transporte, infraestructura y aspectos asociados al uso del compostaje y reciclaje se muestra un mejor desempeño ambiental por parte del escenario 2, mostrando aspectos positivos comunes con el escenario 1 por la recuperación energética y la disminución de carga de RSU en las tecnologías de relleno sanitario e incineración.

Sin embargo es necesario poner en discusión la diferencia poco significativa entre el escenario 1 y 2, pues en el escenario 1 al tener una separación adecuada de los RSU puede generar alta eficiencia en la recuperación energética por la fracción orgánica debido a su poder calorífico, caso contrario en el escenario 2 con el que si se incluyera el compostaje habría que reducir la fracción orgánica que se lleva a incineración bajando la eficiencia energética de esta tecnología; por otro lado la fracción orgánica que se lleva a compostaje tardaría más tiempo en generar un subproducto aprovechable y habría que incluir maquinaria para el transporte en cuanto a distribución, incrementando impactos asociados al consumo de recursos fósiles.

Con el fin evaluar el daño ambiental se realiza la evaluación endpoint mediante el método World ReCiPe EndPoint H/A, encontrando que el componente más afectado es la salud humana, debido a que este contiene las categorías midpoint como cambio climático, toxicidad humana, cuyos resultados evidencian mayor relevancia (Ver *Figura 21* y *Figura 22*). Por otro lado, se muestra que el sistema actual de disposición final de RSU de la ciudad de Bogotá genera mayor impacto para las tres categorías de daño, evidenciando que es necesario implementar otra tecnología para disminuir la carga de RSU que ingresa a relleno sanitario.

Figura 23: Evaluación Endpoint comparando los escenarios

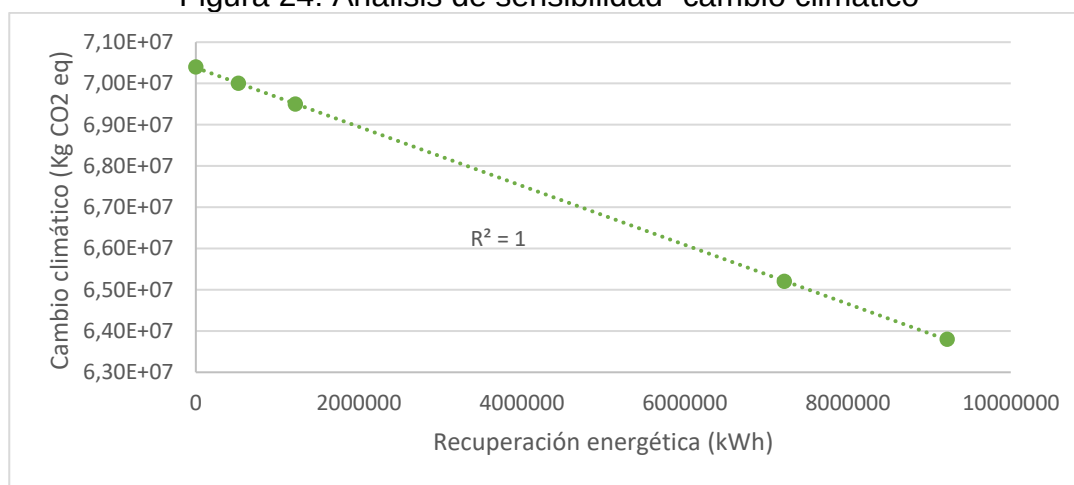


Fuente: Autores a partir de los resultados de Simapro

Según la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD) una de las problemáticas actuales de la gestión de los RSU en la ciudad de Bogotá radica en que la vida útil de Doña Juana perdurara hasta el año 2021 [10]. Por lo que en la presente investigación se realiza un análisis de ciclo de vida comparando tres escenarios de disposición de RSU, evidenciando el escenario 1 (Relleno Sanitario 50%, Incineración 35%, Separación 15%) como una alternativa que puede mejorar el desempeño ambiental de la disposición final de RSU gracias a valorización de los residuos energéticamente; sin embargo, se hacen necesaria estudios relacionados con el desempeño social y económico de este sistema para ser tomada en cuenta en la toma de decisiones de la ciudad de Bogotá en materia de gestión ambiental de RSU.

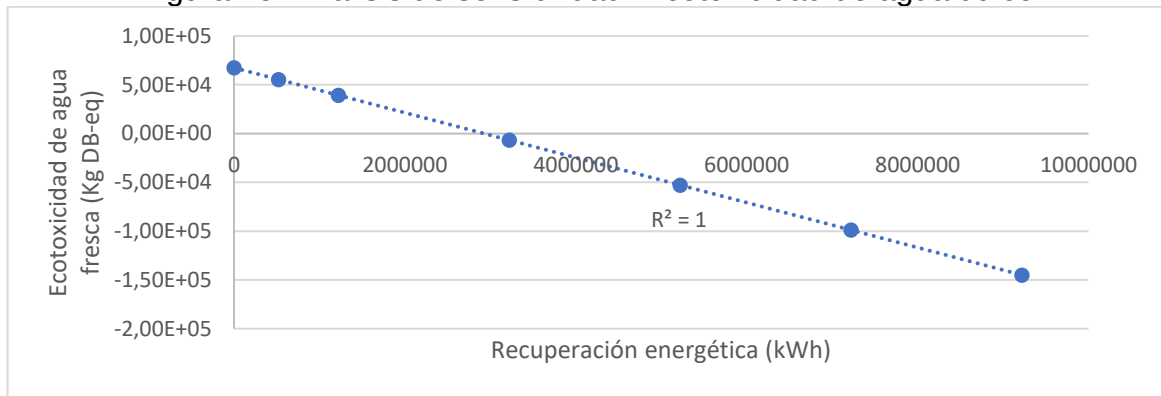
Como soporte a la confiabilidad de los datos y los resultados se realizó un análisis de sensibilidad para identificar la variable que al ser modificada genera cambios significativos en los resultados, según una investigación realizada por Hon Jinglan en la revista waste management en el año 2010 la recuperación energética muestra correlación en la disposición final de los RSU en categorías como compuestos cancerígenos y calentamiento global [28], razón por la cual se realizó el análisis de sensibilidad de esta variable.

Figura 24: Análisis de sensibilidad- cambio climático



Fuente: Autores

Figura 25: Análisis de sensibilidad- Ecotoxicidad de agua dulce



Fuente: Autores

En la *Figura 24* y *Figura 25* se muestra el análisis de sensibilidad para las categorías de cambio climático y ecotoxicidad de agua dulce, presentando correlación en ambas categorías, es que decir por cada 1´000.000kWh/mes de energía recuperada hay un decrecimiento en 715.300Kg CO₂ eq para la categoría de cambio climático y 23.000 Kg DB eq para la categoría de ecotoxicidad de agua dulce, mostrando que la recuperación energética es un parámetro que interviene en gran medida en los resultados de las categorías de impacto.

5 CONCLUSIONES

- Con relación al panorama actual de los RSU se pudo observar una tendencia al crecimiento en la generación de los residuos sólidos urbanos en la ciudad de Bogotá, pues en el periodo comprendido de 2000 a 2017 ha incrementado en un 37,8% la generación de residuos sólidos urbanos en Ton/mes.
- Las políticas como el PGIR y el programa de basura cero no se aplicaron correctamente durante la administración del periodo (2012-2015), por lo que se ha venido reglamentando el aprovechamiento bajo un nuevo esquema (Decreto 596/2016) con el fin disminuir los residuos enviados a relleno sanitario. Sin embargo, es necesario ampliar los horizontes para implementar otro tipo de método de tratamiento de RSU, pues actualmente siguen ligados los contratos en materia de presupuesto a lo convencional (relleno sanitario) dado que es el sistema de disposición final más económico. Limitando el desarrollo tecnológico y la valorización que se puede brindar a los residuos sólidos.
- La aplicación de la metodología AHP permitió seleccionar los escenarios de tratamiento y disposición final, en donde intervinieron variables que influyen de manera significativa en la ciudad de Bogotá, tales como composición de los residuos, cantidad de residuos a tratar, entre otras; encontrando que los escenarios a analizar fueron 1) Separación- Incineración- Relleno Sanitario y 2) Separación- Incineración- Compostaje- Relleno Sanitario.
- A través de la aplicación del ACV se pudo verificar que la metodología expuesta en la ISO 14040 en conjunto con el uso del software Simapro es una estrategia eficaz para valorar los impactos ambientales en el ciclo de vida de la disposición final de los residuos. Para el proyecto, esta metodología permitió identificar que hay dos puntos críticos en la operación del relleno sanitario: 1) la planta de lixiviados que al no ser 100% efectiva sigue realizando vertimientos con contenidos de metales al agua y 2) la emisión de gases efecto invernadero a la atmosfera en las celdas de disposición. Por lo que la recuperación energética por tratamiento térmico en la incineración y la planta de Biogás en relleno sanitario es fundamental para compensar los impactos negativos asociados a la operación de estos sistemas y generar una valorización en pro de la mejora de la gestión de los RSU.
- Al realizar el Análisis de ciclo de vida para la combinación de tecnologías se obtuvo un resultado final en el que el escenario 2 obtuvo un mejor desempeño ambiental seguido por el escenario 1 con una diferencia poco significativa de 500 MPt aproximadamente. Es del caso resaltar que el escenario 2 al incluir compostaje tarda más tiempo en generar un

subproducto valorizable caso contrario al escenario 1, en donde el subproducto al ser energía eléctrica puede ser aprovechado en menor rango de tiempo, proponiendo como alternativa más viable el escenario 1.

- Algunas de las limitaciones del proyecto fueron que el software maneja partes del ciclo de vida de productos por defecto, que en el caso de estudio no aplican límite del sistema. Además, para el caso colombiano no se tienen bases de datos que modelen la producción de energía nacional, lo que interviene directamente en los resultados.
- Se evaluaron los impactos ambientales mediante la selección de 9 categorías de impacto mostrando como las categorías más afectadas cambio climático y ecotoxicidad de agua dulce, justificando los puntos críticos anteriormente mencionados.
- Con el fin de adicionar credibilidad a los resultados se aplicó un análisis de sensibilidad, el cual mostró correlación entre la recuperación energética y las categorías de impacto. Esto quiere decir que es la variable que modifica drásticamente los resultados, que con aumentar 1'000.000 kWh se disminuye en 715.300Kg CO₂ eq para la categoría de cambio climático.
- Se concluye a partir del desarrollo de este proyecto que la propuesta de implementar un análisis de ciclo de vida para evaluar el desempeño ambiental de distintos escenarios de disposición final de RSU entrega una visión coherente y permite reconocer las debilidades y puntos críticos en algunas etapas del proceso, siendo una herramienta eficaz para la toma de decisiones en diferentes administraciones que manejan el ámbito de la disposición final de los residuos sólidos urbanos en la ciudad de Bogotá
- Con el desarrollo de la investigación y estudios afines se comprobó que la metodología ReCiPe MidPoint y EndPoint permite la evaluación de los impactos ambientales de una manera más concisa para temas asociados al tratamiento y disposición final de RSU.
- La metodología AHP generó como tercer escenario viable el IR (Incineración y relleno sanitario); sin embargo, en el desarrollo del proyecto se identificó que la ciudad está avanzando hacia un nuevo esquema de aprovechamiento basado en la separación, por lo que no fue seleccionado para evaluar en el análisis de ciclo de vida.

6 RECOMENDACIONES

- La metodología propuesta en el proyecto incluye únicamente la evaluación ambiental del tratamiento y disposición final de los RSU, para poder ser implementada se sugiere desarrollar un análisis de ciclo de vida social y económico que brinden herramientas y soportes al momento de la toma de decisiones en materia de disposición final.
- Se recomienda empezar a trabajar en una base de datos continua y actualizada para el ámbito nacional en materia de procesos de producción de energía, sistemas de tratamiento (potabilización de agua, disposición final de RSU, tecnologías tratamiento de emisiones, entre otros), extracción de recursos, producción de insumos con el fin de que las modelaciones futuras brinden resultados más cercanos a la realidad del país.
- Para lograr una gestión integral eficiente de los residuos sólidos urbanos en la ciudad de Bogotá se propone aplicar la metodología del análisis de ciclo de vida en las etapas de transporte, recolección y aprovechamiento.
- Se sugiere revisar la normativa distrital en materia de la tarifa para la disposición final, pues según el Conpes 3874 no se puede implementar una tecnología más costosa que la actual, siendo este uno de los impedimentos para el crecimiento tecnológico y eficiente de la ciudad.
- Teniendo en cuenta los resultados del ACV se recomienda enfocar la gestión de los residuos al aprovechamiento disminuyendo la carga que es enviada a relleno sanitario. Adicionalmente se recomienda mejorar el sistema de colecta de biogás para incrementar la eficiencia y obtener mejor aprovechamiento energético.
- A pesar del trabajo realizado por algunas administraciones para mejorar la gestión integral de residuos es necesario ser más estrictos para llevar a cabo el cumplimiento de la normatividad y así mismo realizar una búsqueda de incentivos económicos y sociales.
- Durante el desarrollo del proyecto se logró identificar que además de evaluar sistemas de disposición final de RSU también fue necesario incluir tecnologías para el tratamiento de RSU, con el fin de generar escenarios complementarios que permitan disminuir la carga al relleno sanitario Doña Juana.

- La generación de regulaciones en materia de gestión de residuos podría incluir análisis técnicos que integren ACV lo que permite un mejor fundamento con visión de economía circular.

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] UAESP, «Informe mensual de supervisión y control de disposición final,» UAESP, Bogotá, 2014.
- [2] Secretaria Distrital de Ambiente, «Observatorio Ambiental de Bogotá- Disposición de Residuos en el Relleno Sanitario Doña Juana Per Cápita- DRSPC,» 2017. [En línea]. Available: <http://oab.ambientebogota.gov.co/es/indicadores?id=184%26v=l>. [Último acceso: 10 2017].
- [3] UAESP, «Licencia ambiental del relleno sanitario se extiende hasta el 2021,» *La unidad*, pp. 6-7, 2014.
- [4] Secretaria Distrital de Ambiente, Evaluacion y diagnostico del POT Bogota, Bogota, 2015.
- [5] Sputnik, *La poblacion mundial crecerá un 1 % en 2016*, Mexico: Publicacion Sputnik, 2015.
- [6] M. ROMERO TRIGOS, «Caracterización del nuevo esquema " Basura cero" transporte de reciclaje en la ciudad de bogotá,» Universidad de la Salle, Bogotá, 2012.
- [7] SUPERINTENDENCIA DE SERVICIOS PÚBLICOS DOMICILIARIOS, Situación de la disposición final de residuos sólidos en Colombia - Diagnostico 2011-, SSPD, 2011.
- [8] N. PEÑA y C. GRAJALES, «Disposicion final de residuos sólidos,» Republica de Colombia, Bogotá, 2015.
- [9] *Proyecto Acuerdo 113*, 2011.
- [10] A. A. E. Fabián, «Problema actual de la situación mundial, nacional y distrital de los residuos sólidos, análisis del caso de Bogotá D.C. Programa basura cero,» UNAD, Bogotá, 2015.
- [11] C. DUQUE, Sistemas de tratamiento de residuos sólidos, Bogotá D.C: sedesol, 2013.
- [12] Semana, «La inestable apuesta por los biocombustibles,» 20 Febrero 2016. [En línea]. Available: <http://www.semana.com/economia/articulo/biocombustibles-ya-no-son-tan-buen-negocio/461232>. [Último acceso: 11 Septiembre 2016].
- [13] M. Hauschild y M. Barlaz, «LCA in Waste Management: Introduction to Principle and Method,» 2010.
- [14] T. Trecakova y V. Koci, «Mixed municipal waste management in the Czech Republic from the point of view of the LCA method,» *The International Journal of Life Cycle Assessment*, pp. 113-124, 2011.

- [15] A. P. B. Quiroz, Evaluación de la sustentabilidad del aprovechamiento del bagazo de caña e azúcar en el valle del cauca- Colombia a partir del analisis de ciclo de vida, Bogotá: Universidad Distrital, 2016.
- [16] O. J. Sánchez, C. Ariel Cardona y S. D. Lucia, «Análisis de ciclo de vida y su aplicación a la producción de bioetanol: Una aproximación cualitativa,» *Revista universidad EAFIT* , pp. 59-79, 2007.
- [17] ICONTEC, «ISO 14040 GESTION AMBIENTAL. ANALISIS DE CICLO DE VIDA. PRINCIPIOS Y MARCO DE REFERENCIA,» ICONTEC, 2007.
- [18] E. Haya Leiva, «Análisis de ciclo de vida,» Escuela de organización industrial, España, 2016.
- [19] D. SABARATO, Aspectos generales de la problemática de residuos sólidos urbanos, Argentina: Editorial Brujas , 2006.
- [20] P. Zamonsky y S. Bajsa, *Captura y quema de biogas en relleno sanitario y su utilización en la generación de energía eléctrica. La experiencia del relleno sanitario de las rosas*, Uruguay: Universidad de la república de uruguay, 1990.
- [21] j. Poletto y C. da Silva, «Influencia de la Separación de Residuos Sólidos Urbanos para Reciclaje en el Proceso de Incineración con Generación de Energía,» *Información tecnológica*, vol. 20, nº 2, pp. 105-112, 2009.
- [22] D. Gomez, «Reutilización de los residuos orgánicos por compostaje,» Compostores.com, 2007.
- [23] EPA, *Anaerobic Digestion and its Applications*, Office of Research and Development , 2015.
- [24] S. VERMA, *ANAEROBIC DIGESTION OF BIODEGRADABLE ORGANICS IN MUNICIPAL SOLID WASTES*, Columbia, 2002.
- [25] C. Hernandez, *Nuevas tecnologías para el tratamiento de residuos sólidos urbanos en el DF*, Mexico: Universidad nacional autónoma de mexico, 2010.
- [26] Z. U, «Life cycle assessment of pyrolysis–gasification as an emerging municipal solid waste treatment technology,» *International Environmental Science Technology*, pp. 1029-1038, 2013.
- [27] A. Klein, *Gasification: An Alternative Process for Energy Recovery and Disposal of Municipal Solid Wastes*, EEUU: University of columbia, 2002.
- [28] J. Hon, X. Li y C. Zhaojie, «Life cycle assessment of four municipal solid waste management scenarios in China,» *Waste Management*, p. 2362–2369, 2010.
- [29] Ministerio de medio ambiente , Selección de tecnologías de manejo integral de residuos sólidos, Colombia: Fotolito América LTDA, 2002.

- [30] J. C. Osorio Gomez y J. P. Orjuela Cabrera, «El proceso de analisis de jerarquico (AHP) y la toma de desiciones multicriterio. Ejemplo de aplicación.,» *Red de revistas de America Latina, el caribe, españa y portugal*, vol. XIV, nº 39, pp. 247-252, 2008.
- [31] Ö. D, Y. Ü y D. G, «Life cycle assesment of municipal solid waste management methods: Ankara case study,» *Environment International*, pp. 405-411, 2006.
- [32] M. Ripa, G. Fiorentino, V. Vacca y S. Ulgiati, «The relvance of site specific data of life cycle assesment. The case of municipal solid waste management in the metropolitan city of Naples (Italy),» *Journal of cleaner production*, pp. 445-460, 2016.
- [33] K. A. Ibrahim Menoufi, *Life cylce analysis and Life cycle impact assesment methodologies: A state of the art*, Lerida: Universidad de Leida, 2011.
- [34] UAESP, «Expediente 1919,» UAESP, Bogotá, 1986.
- [35] M. Huijbergts, Z. Steinmann, P. Elshout y R. Van Zelm, *A harmonized life cycle assesment method at midpoint and endpoint level Report I: Characterization*. Reciper 2016, Holanda: National institute for public health and the envieronment, 2016.
- [36] uaesp, «Informe mensual de supervición y control de disposicion final marzo 2017,» UAESP, Bogotá, 2017.
- [37] Departamento nacional de planeación, *Documento CONPES 3874*, Bogotá, 2016.
- [38] DANE, «Censo poblacional 2005- reusltados Bogotá y municipios metropolitanos,» Bogotá, 2005.
- [39] El TIEMPO, «Derrumbe en el relleno de Doña Juana prende las alarmas,» *El TIEMPO*, pp. <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-16393187>, 2 10 2015.
- [40] Redacción Bogotá, «Distrito dice que protesta doña juana fue una toma violenta,» *EL ESPECTADOR*, 14 08 2017.
- [41] CGR Doña Juana, «Estudio de impacto ambiental complementario para la fase 2 de optimización de zonas VII y VIII,» CGR Doña Juana, Bogotá, 2013.
- [42] Alcaldia de Bogotá, *Plan de desarrollo 2012-2016*, Bogotá: Alcaldia de Bogotá, 2012.
- [43] M. Romero, *Caracterización del nuevo esquema "basura cero" transporte del reciclaje en la ciudad de Bogotá*, Bogotá: Universidad de la salle, 2014.
- [44] Alcaldia mayor de bogotá, *Decreto 2981 del 2013*, Colombia: Alcaldi mayor de Bogotá, 2013.
- [45] UAESP, *Plan de gestion integral de residuos sólidos*, Bogotá: Alcaldia de Bogotá, 2016.

- [46] A. Caputo y P. Pelagagge, «RDF production plants: I Design and costs,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 22, p. 423–437, 2001.
- [47] UAESP, *Plan de inclusión para la población recicladora*, Bogotá: UAESP, 2012.
- [48] F. Castro, «Caracterización de la población recicladora de oficio en Bogotá,» UAESP, Bogotá, 2014.
- [49] Ministerio de vivienda, ciudad y territorio, *Decreto 596 del 2016*, Bogotá, 2016.
- [50] S. E. Yay, «Application of life cycle assessment (LCA) for municipal solid waste management: a case study of Sakarya,» *Journal of Cleaner Production*, pp. 284-293, 2015.
- [51] F. Ogundipe y O. Jimoh, «Life cycle assessment of municipal solid waste management in Minna, Niger State, Nigeria,» University of technology , Minna, 2015.
- [52] V. Bisinella, R. Gozte, K. Conradsen, A. Damgaard, T. Christensen y T. Astrup, «Importance of waste composition for Life Cycle Assessment of waste management solutions,» *Journal of Cleaner Production*, pp. 1180-1191, 2017.
- [53] A. Varma, «TECHNOLOGY OPTIONS FOR TREATMENT OF MUNICIPAL SOLID WASTE WITH SPECIAL REFERENCE TO KERALA,» *Research Gate*.
- [54] C. Tsao-Chou y L. Cheng-Fang, «CO2 EMISSION FROM MUNICIPAL SOLID WASTE INCINERATOR: IPCC FORMULA ESTIMATION AND FLUE GAS MEASUREMENT,» *Environmental Engineer Management*, nº 1, pp. 9-17, 2010.
- [55] H. Leffertstra, *Anaerobic Digestion Turning Organic Waste into Energy and Fertilizer*, España: EUREC, 2003.
- [56] C. Martínez Gasol y R. Farreny Gaya, *Modelo de calculo de emisiones de gases de efecto invernadero asociados a determinados escenarios de gestion de residuos municipales*, 2011.
- [57] J. a. V. Rodriguez, *Análisis de ciclo de vida de sistemas de tratamiento de aguas residuales : influencia de los materiales utilizados*, Barcelona: UAB, 2010.
- [58] M. Goedkoop, r. Heijungs, M. Huijbregts, A. Schryver, J. Struijs y R. Zelm, *A life cycle impact assesment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and endpoint level*, Holanda: Ministerue van volkshuivesting, 2009.
- [59] BASIPESA, «Basipesa- Bascula camionera,» 1 12 2009. [En línea]. Available: www.basipesa.com/producto.aspx?id=91. [Último acceso: 23 06 2017].
- [60] O. c. limpia, Interviewee, *Operaciones del relleno*. [Entrevista]. 1 07 2017.
- [61] CAMINOS Y PUENTES, «TABLA DE RENDIMIENTOS COMBUSTIBLE PARA VEHÍCULOS, MAQUINARIA Y EQUIPO DE CONSERVACIÓN 2004,» CAMINOS Y PUENTES, Mexico, 2004.

- [62] DVA de Colombia Ltda, «Hoja de seguridad DURMIX 48E,» DVA, Bogotá, 2005.
- [63] EVANS, «bombas sumergibles para lodos, aguas negras y trituradoras,» EVANS, Mexico, 2013.
- [64] DLC tratamiento de aguas, «Catalogo DLC tratamiento de aguas y soluciones ambientales,» DLC, Chile, 2015.
- [65] G. d. o. d. l. p. d. B. Fernando Parraga, Interviewee, *Visita guiada Planata de Biogás*. [Entrevista]. 17 08 2017.
- [66] Y. Camargo y A. Velez, «Emisiones de biogas producidas en relleno sanitario,» de *Segundo simposio iberoamericano de ingenieria de residuos*, Brranquilla, 2009.
- [67] Life cycle iniciative, «Final report of the LCIA definitions study,» Institute of environmental science and technology, Suiza, 2003.
- [68] S. Manahan, Environmental Chemistry, CRC Press, 1994.
- [69] L. Azevedo, F. Verones, A. Henderson y R. van Zelm, *first batch of the LC-Impact methodology. Eutrophication of freshwater*, USA, 2015.
- [70] A. P. Acero y c. C. a. Rodriguez, *Impact assement methods in life cycle assesment and their impact categories*, Berlin: Greendelta, 2016.
- [71] R. van Zelm, P. Preiss y R. Van Dingenen, *first batch of the LC-Impact methodology. Terrestrial acidification*, 2015.
- [72] M. Zhousechield y M. Huijbergts, Life Cycle Impact Assesment, Inglaterra: Springer, 2015.
- [73] c. Bartolome, M. Huertas y R. Martinez, «Cambio climático mecanismos de desarrollo limpio, Biogas doña Juana,» *Revista de proactiva y medio ambiente*, nº 6, pp. 10-15, 2009.
- [74] G. Aguilar y K. Kofalusi, «Los productos y los impactos de la descomposición de residuos solidos urbanos en el sitio de disposicion final,» *Gaceta ecológica*, nº 79, pp. 39-51, 2006.
- [75] V. Mosher, P. Czepiel y J. Shorter, «Mitigation of methane emissions at landfill sites in new england, USA,» *Energy conversion and management*, vol. 37, nº 8, pp. 11093-1098, 1996.
- [76] R. Moreno, W. BP y B. C, «Documentation of changes implemented in Ecoinvent data base 3.0,» Ecoinvent center, San Galo, 2013.
- [77] G. Leon y H. Benavidez, «Información técnica sobre gases efecto invernadero y el cambio climático,» IDEAM, Colombia, 2007.

- [78] N. Nagpal, TECHNICAL REPORT - WATER QUALITY GUIDELINES FOR COBALT, Canada: Water Protection Section Water, Air and Climate Change Branch Ministry of Water, Land and Air Protection, 2004.
- [79] N. T. Torre, Analisis de ciclo de vida (ACV) estudio economico de una planta de incineración de residuos solidos urbanos (RSU), España: Universidad de Cantabria, 2013.
- [80] A. Payan, E. Bemposta y J. Fuente, «Punto focal de residuos de Cantabria,» Grupo DEPRO, Cantabria, 2005.
- [81] j. Ilari y M. Rodrigo, *Gestion de residuos sólidos urbanos*, España: Universidad politecnica de valencia, 2017.
- [82] V. Furrari, J. Makinen, J. Salminen, R. Braga, E. Dinelli y H. Revitzer, «Metal removal from municipal solid waste incineration fly ash: a comparisson between chemical leaching and bioleaching,» *waste management*, nº 60, pp. 397-406, 2016.
- [83] A. Saer, S. Lansing, N. Davitt y R. Graves, «Life cycle assessment of a food waste composting system: environmental impact hotspots,» *Journal of Cleaner Production*, nº 52, pp. 234-244, 2013.
- [84] A. Sharaai, N. Mahmood y A. Sulaiman, «Ozone depletion substances (ODS) emission analysis from the life cycle of chemical substances and electricity used in potable water production in malaysia,» *Australian journal of basic and applied sciences*, vol. 4, nº 9, pp. 4286-4293, 2010.
- [85] V. Breemen, A. Burrough, E. Velthorst, V. Dobben, d. t. Wit y T. Ridder, «Soil acidification from atmospheric ammonium sulphate in forest canopy throughfall,» *Nature* , pp. 548-550, 1982 .
- [86] E. Röben, «Diseño, Construcción, Operación y Cierre de Rellenos Sanitarios Municipales,» Municipalidad de Iloja, Ecuador, 2009.
- [87] L. Ikan, «Archivo: Quema de Gas,» 123RF, 2005. [En línea]. Available: https://es.123rf.com/photo_36651748_la-quema-de-gas-antorcha-contra-el-cielo.html. [Último acceso: 8 08 2017].
- [88] «Midwest Bio Systems,» Windrow turners and moisture management systems from Midwest Bio-Systems create high-quality humified compost, 2017. [En línea]. Available: <http://midwestbiosystems.com/education-corner/windrow-turners-and-moisture>. [Último acceso: 12 8 2017].
- [89] S. Erses, «Aplication of life cicle assesment for municipal solid waste management: a case study of Sakarya,» *Journal of Cleaner Production*, pp. 284-293, 2015.
- [90] Mancini, M. Paes y G. Medeiros, «Environmental Impact Assessment of Municipal Solid Waste Management Systems by Life Cycle Assessment,» Brasil, 2015.

- [91] A. Vallejo y M. Asunción, Utilización del Análisis del ciclo de vida en la evaluación del impacto ambiental del cultivo bajo invernadero mediterráneo, Cataluña: Universidad Politecnica de Catalunya, 2004.
- [92] J. L. Sanchez Lozano, J. J. Oliveros Acosta, J. A. Escobar Vargas, M. Yossef, C. Cardona y C. Garay, «NUMERICAL SIMULATION OF FLOW AND SEDIMENT TRANSPORT DYNAMICS ON THE MAGDALENA RIVER SECTION OF BARRANCABERMEJA-LA COQUERA (COLOMBIA).», IAHR, 2015.
- [93] WORLD BANK DATA TEAM, «World Bank list of economies (June 2017),» 01 07 2017. [En línea]. Available: <https://blogs.worldbank.org/opendata/es/nuevas-clasificaciones-de-los-paises-seg-n-su-nivel-de-ingreso-2017-18>.
- [94] Confederación Suiza, Waste Management National Reporting to CSD 18/19 by Switzerland, Suecia, 2009.

ANEXOS

Anexo 1: aplicación metodología AHP para la selección de escenarios de tecnologías para la disposición final de residuos sólidos urbanos

A continuación, se presenta la aplicación de la tecnología AHP para la selección de escenarios para la disposición final de RSU, siguiendo la metodología de la sección 2 se muestran en primera instancia el cálculo de vector de prioridad para los escenarios (Ver tabla *Tabla R,S,T,U,V,W*), seguido por la priorización de los criterios para finalmente multiplicar matricialmente los vectores obtenidos en la tablas R – W con el vector obtenido en la tabla F y obtener los escenarios más propicios según los criterios seleccionados (Ver tabla G).

Tabla R: Vector de prioridad escenarios según sensibilidad a la composición

	RIL	RADL	IL	RCIL	RGL						Vector prioridad
RIL	1	8	3	7	8	0,579	0,557	0,264	0,524	0,285	0,442
RADL	1/8	1	7	1/5	5	0,072	0,069	0,617	0,014	0,178	0,191
IL	1/3	1/7	1	5	7	0,193	0,009	0,088	0,374	0,250	0,183
RCIL	1/7	5	1/5	1	7	0,082	0,348	0,017	0,075	0,250	0,155
RGL	1/8	1/5	1/7	1/7	1	0,072	0,013	0,012	0,010	0,035	0,029

Tabla S: Vector de prioridad de escenarios según sensibilidad a la carga

	RIL	RADL	IL	RCIL	RGL						Vector prioridad
RIL	1	8	3	1/5	7	0,151	0,557	0,290	0,116	0,259	0,275
RADL	1/8	1	1/5	1/5	5	0,018	0,069	0,019	0,117	0,185	0,082
IL	1/3	5	1	1/6	7	0,051	0,349	0,097	0,097	0,259	0,170
RCIL	5	1/7	6	1	7	0,757	0,009	0,580	0,585	0,259	0,438
RGL	1/7	1/5	1/7	1/7	1	0,021	0,014	0,014	0,083	0,037	0,034

Tabla T: Vector de prioridad de escenarios según ocupación del espacio

	RIL	RADL	IL	RCIL	RGL						Vector prioridad
RIL	1	3	1/3	1/5	3	0,103	0,565	0,071	0,016	0,243	0,199
RADL	1/3	1	1/5	5	1	0,034	0,188	0,042	0,405	0,081	0,150
IL	3	1/6	1	6	1/3	0,310	0,031	0,213	0,486	0,027	0,213
RCIL	5	1/7	1/6	1	7	0,517	0,027	0,035	0,081	0,567	0,245
RGL	1/3	1	3	1/7	1	0,034	0,188	0,638	0,011	0,081	0,191

Tabla U: Vector de prioridad de escenarios según Impactos ambientales

	RIL	RADL	IL	RCIL	RGL						Vector prioridad
RIL	1	3	1/4	5	5	0,174	0,400	0,051	0,534	0,326	0,297
RADL	1/3	1	3	1/5	1/3	0,058	0,133	0,610	0,021	0,021	0,169
IL	4	1/3	1	3	3	0,697	0,044	0,203	0,320	0,195	0,292
RCIL	1/5	1/6	1/3	1	6	0,035	0,022	0,068	0,106	0,391	0,124
RGL	1/5	3	1/3	1/6	1	0,035	0,400	0,068	0,018	0,065	0,117

Tabla V: Vector de prioridad de escenarios según políticas del país

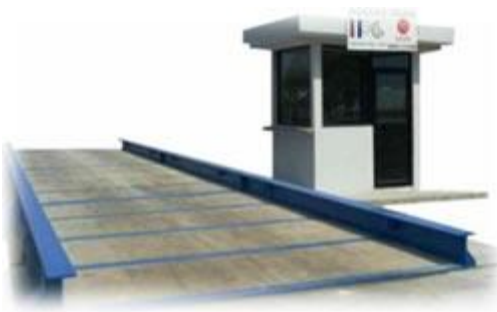
	RIL	RADL	IL	RCIL	RGL						Vector prioridad
RIL	1	6	7	3	5	0,542	0,520	0,385	0,645	0,25	0,468
RADL	1/6	1	6	1/5	3	0,090	0,087	0,330	0,043	0,15	0,140
IL	1/7	4	1	1/4	6	0,077	0,346	0,055	0,053	0,3	0,166
RCIL	1/3	1/5	4	1	5	0,181	0,017	0,220	0,215	0,25	0,176
RGL	1/5	1/3	1/6	1/5	1	0,108	0,028	0,009	0,043	0,05	0,047

Tabla W: Vector de prioridad de parámetros de criterio

	1	2	3	4	5						Vector prioridad
1	1	1/3	4	1/5	6	0,096	0,034	0,208	0,034	0,200	0,114
2	3	1	5	1/4	6	0,288	0,103	0,260	0,043	0,200	0,179
3	¼	6	1	1/6	5	0,024	0,622	0,052	0,028	0,167	0,178
4	5	1/7	6	1	7	0,48	0,014	0,312	0,173	0,233	0,242
5	1/6	1/6	1/5	1/7	1	0,016	0,017	0,010	0,024	0,033	0,020

Anexo 2: Descripción Procesos Relleno Sanitario

A continuación, se describe cada uno de los procesos que conforman el relleno sanitario, adicionalmente se detallan los cálculos realizados para la conformación del inventario usado en el análisis de ciclo de vida.

Proceso unitario	Pesaje
Descripción	Es la primera etapa que se lleva a cabo en el relleno sanitario Doña Juana (RSDJ). El camión compactador ingresa al RSDJ pasando por una báscula camionera que registra el peso de los RSU recogidos por el camión y registra la empresa a la que pertenece; lo anterior con el fin de llevar un control interno para la realización de informes y tomar decisiones. 
Equipos	Báscula camionera
Entradas	Energía eléctrica de baja potencia $100KW * \frac{\left(\frac{1KJ}{Seg}\right)}{1 Kw} * \left(\frac{1Kwh}{3600KJ}\right) * \frac{(3600 seg * 24 h * 30 días)}{mes} = \frac{72kWh}{mes}$
Salidas	Emisiones indirectas calculadas por el software Simapro 8.2 mediante la base de datos Ecoinvent versión 3.0

Proceso unitario	Distribución RSDJ
Descripción	 Fuente: Caracol Radio, tomada 15/03/2017 Después de pesado el vehículo recolector y compactador de RSU, este debe recorrer aproximadamente 11 kilómetros desde la puerta de ingreso al Relleno Sanitario Doña Juana hasta el sitio de disposición en el área, contando con el recorrido de regreso, estos vehículos usan como combustible Diesel. Mensualmente 691 vehículos de recolección llegan al relleno sanitario.
Equipos	Vehículo compactador de residuos sólidos
Entradas	Combustible: Diesel $\frac{13 \text{ gal}}{100 \text{ Km}} = 0,13 \frac{\text{gal}}{\text{Km}} * 11 \text{ Km} = 1,43 \frac{\text{gal}}{1 \text{ viaje}} * \frac{691 \text{ viajes}}{1 \text{ mes}} = 988,13 \frac{\text{gal}}{\text{mes}}$ $988,13 \frac{\text{gal}}{\text{mes}} * 0,0378541 \frac{\text{m}^3}{\text{gal}} = 3,74048 \text{ m}^3 * 832 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ $= 3112,077 \text{ Kg} * \frac{1 \text{ Ton}}{1000 \text{ Kg}} = 3,112 \text{ Ton}$ Fuente: Información primaria brindada por operarios de Ciudad Limpia que recorren la ruta en Kennedy que cubren las Av Villavicencio y Av primera de mayo.
Salidas	Emisiones calculadas por el software Simapro 8.2 mediante la base de datos Ecoinvent versión 3.0

Proceso unitario	Compactación
Descripción	 Fuente: El tiempo, tomada el 10/02/2015 Para disponer adecuadamente los residuos y aprovechar el terreno disponible, es necesario reducir el volumen ocupado por estos. Se hace uso de maquinaria pesada para la compactación de los residuos sólidos las 24 horas del día, ya que permite aplicar fuerza suficiente para reducir los espacios entre residuos sólidos y así reducir el volumen de ocupación [86]. Al igual que los vehículos de recolección el combustible usado por esta maquinaria es Diesel.
Equipos	Bulldozer D8 H Tractor Oruga CAT 1973 Compactadora vibratoria CB 214C 1998
Entradas	Combustible: Diesel Horas de operación: $24 \frac{\text{horas}}{\text{Día}} * \frac{30 \text{ Dias}}{1 \text{ mes}} = 480 \frac{\text{horas}}{\text{mes}}$ Cálculo diesel Compactadora 8-36 $\begin{aligned} \text{Consumo} &= 6 \frac{L}{h} * \frac{480 h}{1 \text{ mes}} = 2880 \frac{L}{\text{mes}} * \frac{1 m^3}{1000 L} = 2,880 \frac{m^3}{\text{mes}} * 830 \frac{Kg}{m^3} \\ &= 2396 \frac{Kg}{m^3} * \frac{1 Ton}{1000 kg} = 2,3961 \frac{Ton}{\text{mes}} \end{aligned}$ Cálculo Diesel Bulldozer D8 $\begin{aligned} \text{Consumo} &= 27 \frac{L}{h} * \frac{480 h}{1 \text{ mes}} = 12960 \frac{L}{\text{mes}} * \frac{1 m^3}{1000 L} = 12,96 \frac{m^3}{\text{mes}} * 832 \frac{Kg}{m^3} \\ &= 10782,72 \frac{Kg}{m^3} * \frac{1 Ton}{1000 kg} = 10,7827 \frac{Ton}{\text{mes}} \end{aligned}$ Fuente: [61]
Salidas	Emisiones calculadas por el software Simapro 8.2

Proceso unitario	Recubrimiento
Descripción	Cuando la zona de disposición (actualmente la zona de optimización fase II) llegue al nivel de residuos compactados máximo es necesario realizar un recubrimiento para dar mayor estabilidad al terreno, este nivel dependerá de las características del terreno. Esto se hace con el fin de impedir el contacto de vectores con los residuos y disminuir la emisión incontrolada de gases de descomposición de los RSU. Para lograr esto se hace uso de una retroexcavadora que permite la adecuación de terreno; de acuerdo con la cantidad de residuos dispuestos diariamente en Bogotá se requiere una operación continua, lo que implica un consumo de combustible (Diesel). Los materiales usados para el recubrimiento son tierra negra y arcilla, cuyas especificaciones técnicas establecen un grosor de 0,4 cm; adicional a estos materiales se realizan fumigaciones diarias con un plaguicida cuyo principio activo de Chlorpiriphos disminuye la propagación de agentes infecciosos por vectores.
Equipos	Retroexcavadora 416-C CAT 200
Entradas	1. Retroexcavadora Combustible: Diesel Horas de operación: $24 \frac{\text{horas}}{\text{Día}} * \frac{30 \text{ Días}}{1 \text{ mes}} = 480 \frac{\text{horas}}{\text{mes}}$ Cálculo Diesel Compactadora 8-36 $\begin{aligned} \text{Consumo} &= 7 \frac{L}{h} * \frac{240 h}{1 \text{ mes}} = 1680 \frac{L}{\text{mes}} * \frac{1 m^3}{1000 L} = 1,680 \frac{m^3}{\text{mes}} * 832 \frac{Kg}{m^3} \\ &= 1397,76 \frac{Kg}{\text{mes}} * \frac{1 \text{ Ton}}{1000 kg} = 1,39776 \frac{\text{Ton}}{\text{mes}} \end{aligned}$ 2. Plaguicida Plaguicida Principio activo: Chlorpiriphos $\begin{aligned} \text{Agua} &= \frac{1L}{1 Ha} * 41,52 Ha = 41,52 L \text{ Agua} \\ \text{Pesticida} &= \frac{0,48 Kg}{1 Ha} * 41,52 Ha = 19,9296 Kg \text{ principio activo} \\ 19,9296 Kg * 31 &= 617,81 Kg \text{ principio activo} * \frac{1 \text{ Ton}}{1000 Kg} \\ &= 0,617 \text{ Ton principio activo} \end{aligned}$ 3. Arcilla $\text{Area} = 41,52 Ha * \frac{10000 m^2}{1 Ha} = 415200 m^2$

	$Vol\ 1\ Arcilla = 415200m^2 * 0,4m = 166080m^3$ <i>Densidad Arcilla muy compactada = $1,61 \frac{Ton}{m^3}$</i> $PesoArcilla = 1,61 \frac{Kg}{m^3} * 166080m^3 = 267388,8 \frac{Kg}{mes} * \frac{1\ Ton}{1000kg}$ $= 267,388 \frac{Ton}{mes}$ 4. Tierra negra- Suelo $Area = 41,52\ Ha * \frac{10000m^2}{1\ Ha} = 415200m^2$ $Vol\ 2\ Tierra = 415200m^2 * 0,4m = 166080m^3$ <i>Densidad tierra negra = $1,33 \frac{Kg}{m^3}$</i> $PesoTierra = 133 \frac{Kg}{m^3} * 166080m^3 = 220886,4 \frac{Kg}{mes} * \frac{1\ Ton}{1000kg}$ $= 220,886 \frac{Ton}{mes}$ Fuente: [62] [34] [61]
Salidas	Emisiones calculadas por el software Simapro 8.2

Proceso unitario	Emisiones de Degradación
Descripción	Las emisiones del proceso de degradación se emiten indirectamente, debido a que los gases de este proceso se producen por la descomposición de la materia orgánica que ha sido sepultada en las celdas de disposición. Los gases de este proceso se capturan mediante un sistema de bombeo y son dirigidos a la planta de Biogás para su aprovechamiento. Es del caso mencionar que esta captura no es completamente efectiva, dado que se documenta que aproximadamente el 60% de estos gases, entre los cuales se destacan el CH₄ y el CO₂, se escapan a la atmósfera por medio de infiltración, es por esto que este proceso genera un mayor aporte a la categoría de cambio climático.
Equipos	NA
Entradas	NA
Salidas	Emisiones al aire Se encontró que únicamente el 40% de los gases generados en la degradación de RSU en Relleno sanitario son captados y enviados a planta de biogás, el restante se escapa a la atmósfera. $CH_4 (70\%) = 2307,81 \frac{Ton}{mes} * 0,666666667 = 3983,99 \frac{Ton}{mes}$ $CO_2 (29,5\%) = 2730,92 \frac{Ton}{mes} * 0,666666667 = 4714,41 \frac{Ton}{mes}$ $N_2 (0,5\%) = 31,4107 \frac{Ton}{mes} * 0,666666667 = 52,8029 \frac{Ton}{mes}$ Fuente: [10]

Proceso unitario	Planta de lixiviados (PTL)
Descripción	Fuente: El Espectador, tomada el 1/03/2017 Al momento de degradarse los residuos sólidos orgánicos se producen lixiviados, los cuales son capturados mediante un sistema de bombeo. Al llegar a la planta de lixiviados se conduce el lixiviado mediante Bombas Ap-3 a los procesos físico químicos como sedimentación, aireación y coagulación con el fin de reducir la carga contaminante que será vertida sobre el río Tunjuelo. A pesar de los esfuerzos la planta de lixiviados no es 100% efectiva, por lo que sus vertimientos tienen altas cargas orgánicas y compuestos metálicos.
Equipos	Bomba de lixiviados AP-3 Lagunas de oxidación Depurador de lodos
Entradas	• Aireador: Potencia aireador = 490 Kw Producción aire = 6Kg O₂/ Kwh Consumo energético $490 \text{ Kw} * \frac{\left(\frac{1\text{KJ}}{\text{Seg}}\right)}{1 \text{ Kw}} * \left(\frac{1\text{Kwh}}{3600\text{KJ}}\right) * \frac{(3600 \text{ seg} * 24 \text{ h} * 30 \text{ días})}{\text{mes}} = 352800 \frac{\text{Kwh}}{\text{mes}}$

Proceso unitario	Planta de lixiviados (PTL)
	Consumo energético por bombas de lixiviados Potencia Bombas lixiviados= 45hp $30 \text{ hp} * \frac{0,74 \frac{KJ}{seg}}{1 \text{ hp}} * \frac{1kwh}{3600KJ} * \left(\frac{3600seg}{1 \text{ h}} * \frac{24h}{1 \text{ día}} * \frac{30día}{mes} \right) = 24170,2 \frac{Kwh}{mes}$ Fuente: [34] [63]
Salidas	$Q_e = 14,13 \frac{L}{s} * \left(3600 \frac{s}{hora} \right) * \left(24 \frac{h}{Día} \right) * \left(30 \frac{dia}{mes} \right) = 36624960 \frac{L}{mes}$ Aluminio = $270988079 \frac{mg}{mes}$ Arsénico= $978999,04 \frac{mg}{mes}$ Berilio= $1831248 \frac{mg}{mes}$ Cadmio= $366249,6 \frac{mg}{mes}$ Zinc= $14137234,56 \frac{mg}{mes}$ Cobalto= $4065370,56 \frac{mg}{mes}$ Cobre= $7324992 \frac{mg}{mes}$ Cromo total= $23513224,32 \frac{mg}{mes}$ DBO₅= $1,006729 \times 10^{11} \frac{mg}{mes}$ Hierro= $701441233,9 \frac{mg}{mes}$ Litio= $3369496,32 \frac{mg}{mes}$

Proceso unitario	Planta de lixiviados (PTL)
	Manganeso= $6958742,4 \frac{mg}{mes}$ Molibdeno= $952248,96 \frac{mg}{mes}$ Plomo= $3662496 \frac{mg}{mes}$ Níquel= $12452486,4 \frac{mg}{mes}$ Lodos Consumo energético $60 Kw * \frac{\left(\frac{1KJ}{Seg}\right)}{1 Kw} * \left(\frac{1Kwh}{3600KJ}\right) * \frac{(3600 seg * 24 h * 30 días)}{mes} = 43200 \frac{Kwh}{mes}$

Proceso unitario	Biogás Quema
Descripción	 Fuente: [87] El biogás captado es conducido a la planta de Biogás Doña Juana, en la cual se realiza una quema de gases de emisiones en antorcha con el fin de reducir las emisiones de CH₄ transformándolo en CO₂ biogénico, cuyo potencial de calentamiento es menor al del metano. Adicionalmente es del caso mencionar que Biogás Doña Juana entra al mercado de bonos de carbono al reducir la emisión de Gases Efecto Invernadero.
Equipos	Antorcha
Entradas	NA
Salidas	Quema CO₂= $31229,72 \frac{Ton}{mes}$ CH₄= $187,37 \frac{Ton}{mes}$ NO₂= $0,35 \frac{Ton}{mes}$ Fuente: Información suministrada por Fernando Parraga, Gerente de operaciones de la planta de Biogas Doña Juana. Visita realizada el día 17/08/2017

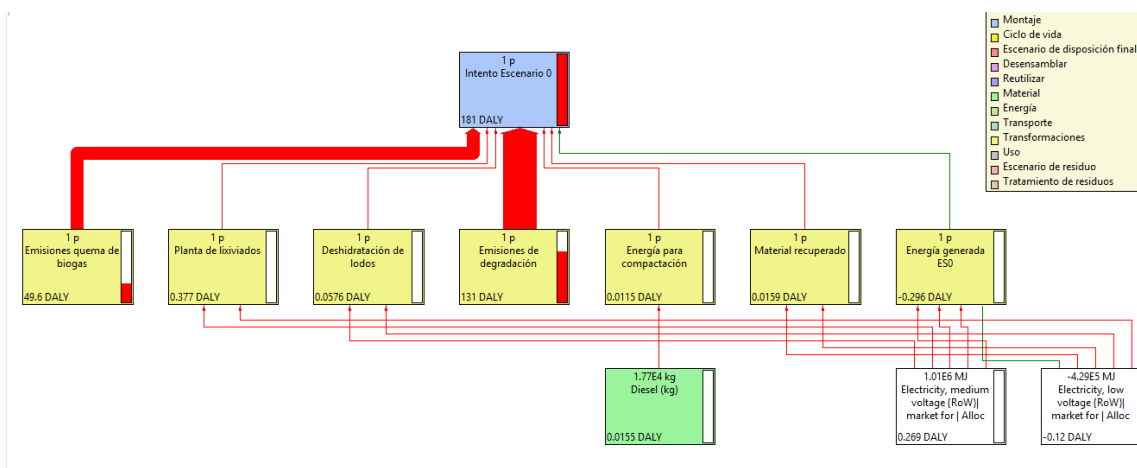
Proceso unitario	Biogás para uso
Descripción	Complementando el proceso llevado a cabo en la planta de Biogás Doña Juana, S.A se realiza una recuperación energética mediante generadores de alta potencia, los cuales aprovechan el potencial calorífico del gas para generar energía eléctrica que será distribuida en la res o utilizada para autoabastecimiento.
Equipos	Chillers Filtros Carbón activado Soplante marca continental motor eléctrico ABB Generadores
Entradas	Carbón activado $1 \text{ silio de } \frac{20m^3}{2 \text{ años}} * \left(\frac{1 \text{ año}}{12 \text{ meses}} \right) = 0,8333 \frac{m^3}{mes} * \left(\frac{500kg}{m^3} \right)$ $= 416,6666 \frac{Kg}{mes} * \left(\frac{1Ton}{1000Kg} \right) = 0,4166666 \frac{Ton}{mes}$ Polietileno alta densidad (PEAD) $500 \frac{m}{mes} * \left(2,846 \frac{Kg}{m} \right) = 1.423 \frac{Kg}{mes} * \left(\frac{1Ton}{1000Kg} \right) = 1,423Ton/mes$ Electricidad voltaje medio Chiller $6KW * \frac{\left(\frac{1KJ}{Seg} \right)}{1 Kw} * \left(\frac{1Kwh}{3600KJ} \right) * \frac{(3600 \text{ seg} * 24 \text{ h} * 30 \text{ días})}{mes} = 4.320 \frac{Kwh}{mes}$ Generado $45KW * \frac{\left(\frac{1KJ}{Seg} \right)}{1 Kw} * \left(\frac{1Kwh}{3600KJ} \right) * \frac{(3600 \text{ seg} * 24 \text{ h} * 30 \text{ días})}{mes} = 64.800 \frac{Kwh}{mes}$ Soplante $200KW * \frac{\left(\frac{1KJ}{Seg} \right)}{1 Kw} * \left(\frac{1Kwh}{3600KJ} \right) * \frac{(3600 \text{ seg} * 24 \text{ h} * 30 \text{ días})}{mes} = 144.000 \frac{Kwh}{mes}$ Fuente de datos: Información proporcionada por el gerente de operaciones de la planta de Biogás Doña Juana el día 17/08/2017
Salidas	Emisiones calculadas por el software Simapro 8.2

Anexo 3: Árboles de contribución de procesos

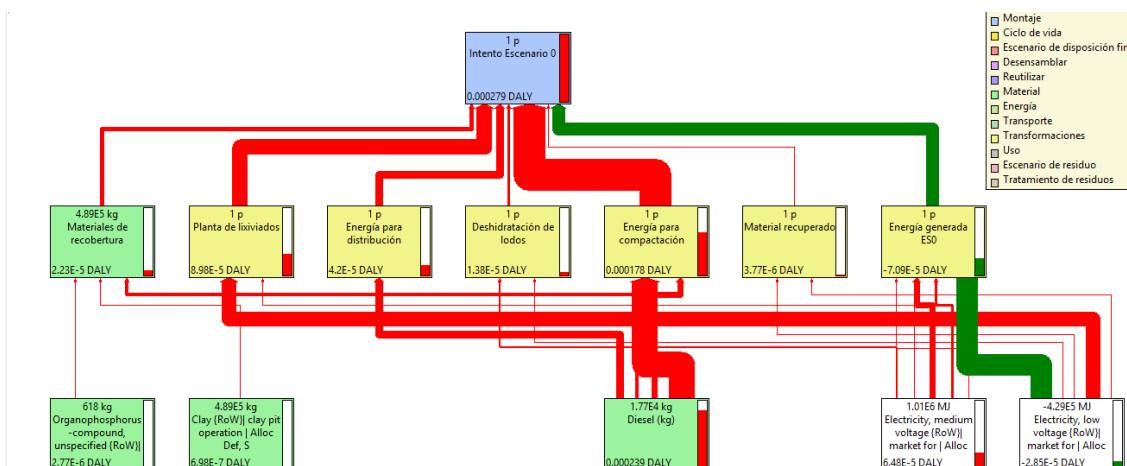
A continuación, se presentan los árboles de contribución de procesos, lo cuales permiten identificar el o los procesos con mayor aporte a las categorías seleccionadas en el proyecto. Es posible identificar dicha contribución observando que las líneas rojas y verdes, donde las rojas indican impactos negativos y los verdes impactos positivos, el mayor grosor son las que representan el mayor aporte.

Estos árboles muestran los procesos (recuadros color amarillo) que conforman el montaje realizado en el software Simapro (recuadro color azul), cada proceso tendrá asociadas unas entradas, ya sea de energía o de materiales, los cuales estarán identificados de color blanco y verde claro respectivamente.

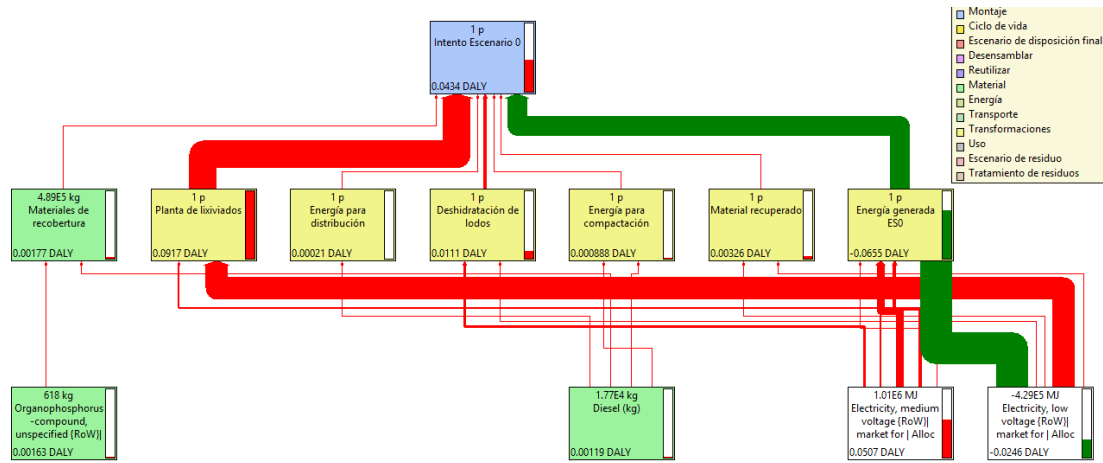
- Cambio climático



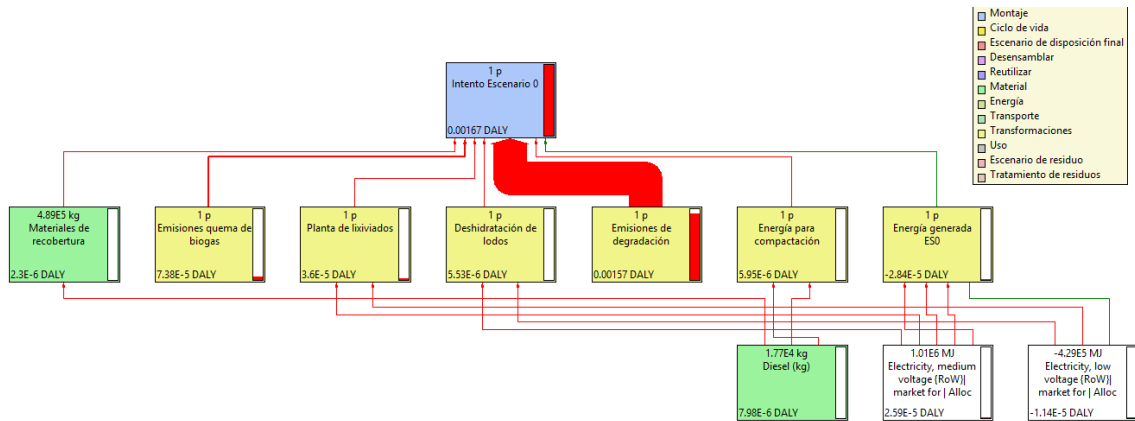
- Agotamiento capa de ozono



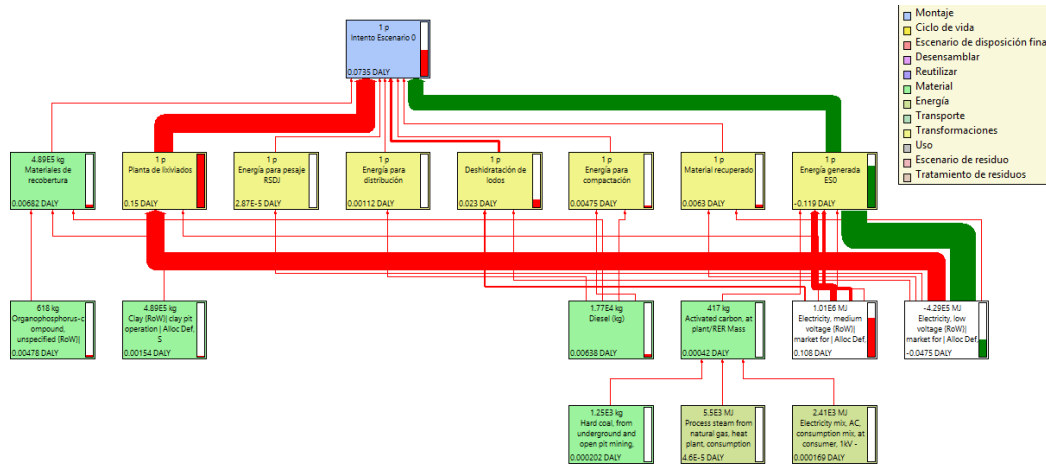
- Toxicidad Humana



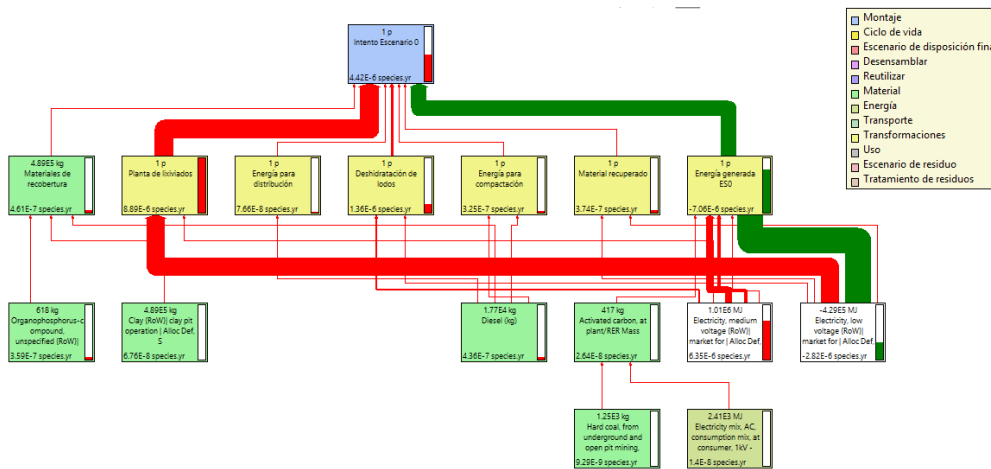
- Formación de oxidantes fotoquímicos



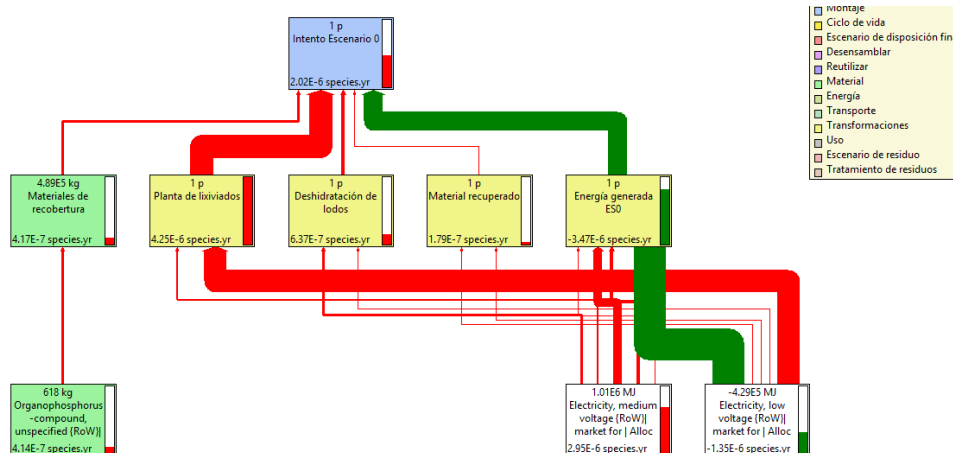
- Formación de partículas



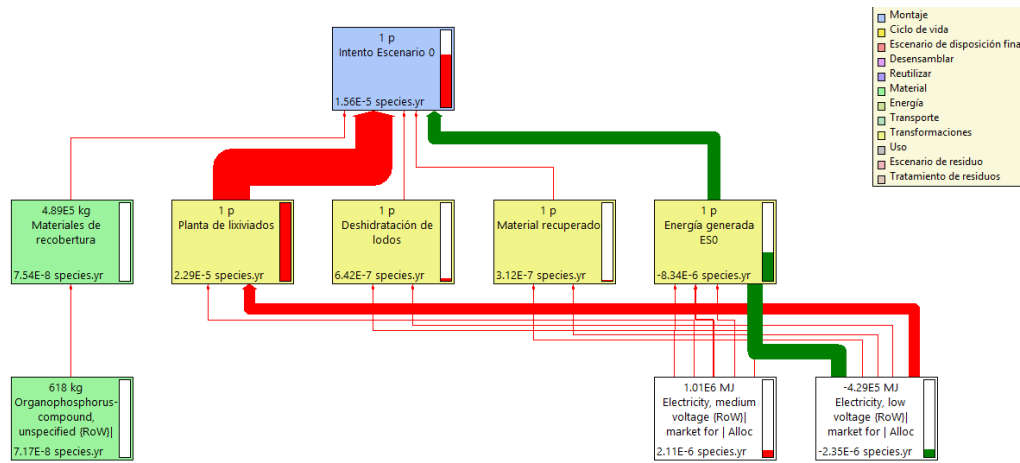
- Acidificación terrestre



- Eutrofización de agua dulce



- Ecotoxicidad de agua dulce



Anexo 4: Descripción de procesos de incineración

Proceso unitario	Tratamiento Térmico
Descripción	Este proceso busca reducir el volumen de los residuos sólidos urbanos que son ingresados a esta etapa, se alcanza a reducir el volumen de un sólido hasta un 90% y su peso alrededor del 70%; en esta etapa también se realiza una estabilización del residuo en donde la fracción orgánica de los RSU se incinera volviéndose inerte, de esta manera se disminuye la carga orgánica que es transportada a relleno sanitario implicando un beneficio dado que la fracción orgánica es la encargada de la generación de gases efecto invernadero. Otra etapa importante es la recuperación energética en el proceso de combustión, en donde se usa el vapor para autoabastecimiento de la planta o distribución aledaña. Por último, se realiza la higienización de los residuos para eliminar los patógenos antes de ser enviados al relleno sanitario. El diagrama ilustra el proceso de incineración en cuatro etapas principales: 1. Recepción: Representado por una camioneta que descarga residuos. 2. Tratamiento térmico y recuperación de energía: Representado por una planta industrial con chimeneas y un hogar. 3. Depuración de gases: Representado por una lámpara que indica la generación de energía. 4. Cenizas: Representado por un contenedor que recoge los residuos resultantes. Fuente: [79]
Equipos	Parrilla de incineración
Entradas	• Diesel • Agua

	$0,2215 \frac{m^3}{Ton\ RSU} * 64349,11 \frac{TonRSU}{mes}$ $= \frac{14627,33\ m^3}{mes} * \left(1 \frac{Kg}{cm^3}\right) * \left(\frac{1000000cm^3}{1m^3}\right)$ $* \left(\frac{1Kg}{1000g}\right) * \left(\frac{1Ton}{1000Kg}\right)$ $= 14257,33Ton\ agua/mes$ - Aire $7,028 \frac{Tonaire}{Ton\ RSU} * 64349,11 \frac{TonRSU}{mes} = 425.267,36 \frac{Tonaire}{mes}$ - Electricidad $33,062 \frac{kWh}{TonRSU} * 64349,11 \frac{TonRSU}{mes} = 2127501,75 \frac{kWh}{mes}$
Salidas	Emisiones indirectas calculadas por el software Simapro 8.2

Proceso unitario	Tratamiento de gases
Descripción	Esta etapa de tratamiento de gases se compone de un sistema de reducción selectiva no catalítica, que con ayuda de urea que reduce los NOx; el sistema posee un absorbedor semi-seco que reduce compuestos halogenados HCl, HF y SOx. Para eliminar las dioxinas, furanos y otros compuestos orgánicos se incluye carbón activado; por último, se implementa un filtro de mangas para tratar el gas de combustión.  Fuente: [79]
Equipos	Filtro de mangas
Entradas	- Urea $0,84 \frac{Kg}{TonRSU} * 64349,11 \frac{TonRSU}{mes} = 53924,55 \frac{Kg}{mes} * \left(\frac{1TonRSU}{1000Kg} \right)$ $= 53,92 \frac{TonRSU}{mes}$ - Carbón activado $0,75 \frac{Kg \text{ Carbon activado}}{TonRSU} * 64349,11 \frac{TonRSU}{mes}$ $= 48.350,95 \frac{Kg}{mes} * \left(\frac{1Ton}{1000Kg} \right)$ $= 48,35 \frac{Ton \text{ carbon activado}}{mes}$
Salidas	Emisiones al aire

Proceso unitario	Tratamiento de gases
	Aluminio = $16085,6 \frac{mg}{mes}$ Arsénico= $20383,02 \frac{mg}{mes}$ Bario= $538907,23 \frac{mg}{mes}$ Cadmio= $366249,6 \frac{mg}{mes}$ Zinc= $7158,91 \frac{mg}{mes}$ Cobre= $437986,41 \frac{mg}{mes}$ Cromo= $7253,37 \frac{mg}{mes}$ Monoxido de carbono= $5965,76 \frac{mg}{mes}$ Lantano= $6960,05 \frac{mg}{mes}$ Cloro= $9201,69 \frac{mg}{mes}$ Hierro= $5615,77 \frac{mg}{mes}$ Potasio= $242335,73 \frac{mg}{mes}$ Magnesio= $9631,22 \frac{mg}{mes}$ Manganeso= $344025,65 \frac{mg}{mes}$ Molibdeno= $11931,52 \frac{mg}{mes}$ Plomo= $3662496 \frac{mg}{mes}$ Níquel= $43748,92 \frac{mg}{mes}$ Sodio= $4006009,72 \frac{mg}{mes}$ Fosforo= $2635375,71 \frac{mg}{mes}$ Plomo= $2523517,66 \frac{mg}{mes}$ antimonio= $612484,98 \frac{mg}{mes}$ Silicon= $26547,14 \frac{mg}{mes}$ Estroncio= $276413,67 \frac{mg}{mes}$ Titanio= $518,25 \frac{mg}{mes}$ Vanadio= $5078,98 \frac{mg}{mes}$ Zirconio= $86486,44 \frac{mg}{mes}$ Calcio= $119409,71 \frac{mg}{mes}$

Proceso unitario	Separación magnética de escorias
Descripción	Las escorias se trasladan a la planta de almacenamiento para luego ser cribadas y separar las de las cenizas. La chatarra férrica y los metales no férricos, tales como aluminio, cobre y latón, son separados de la escoria mediante separación magnética con el fin de ser reutilizados o reincorporados en el proceso productivo de alguna metalurgia. 
Equipos	Separado Magnético
Entradas	NA
Salidas	Emisiones al aire Dioxido de carbono = $20704,12 \frac{mg}{mes}$ Niquel= $0,002356 \frac{mg}{mes}$ antimonio= $0,0038 \frac{mg}{mes}$ Arsenico= $0,001016 \frac{mg}{mes}$ Cadmio= $0,0021 \frac{mg}{mes}$ Cloro= $2,231 \frac{mg}{mes}$ Cromo= $0,0016 \frac{mg}{mes}$

	Cobre= $0,0061 \frac{mg}{mes}$
	Manganeso= $0,0025 \frac{mg}{mes}$
	Mercurio= $0,00038 \frac{mg}{mes}$
	Anomio= $1,425 \frac{mg}{mes}$
	Flour= $0,086 \frac{mg}{mes}$
	Oxido sulfurico= $1,0538 \frac{mg}{mes}$
	HAV= $0,0030 \frac{mg}{mes}$
	Zinc= $0,014 \frac{mg}{mes}$
	Plomo= $0,00223 \frac{mg}{mes}$
	Oxido nitrogeno= $55,78 \frac{mg}{mes}$
	Talio= $0,0020 \frac{mg}{mes}$
	Dioxinas= $4,92 \frac{mg}{mes}$

Proceso unitario	Estabilización de cenizas
Descripción	Es un proceso que utiliza el cemento como aglutinante para inmovilizar química y físicamente el contenido peligroso proveniente del residuo. La estabilización se realiza para reducir la solubilidad y la toxicidad de los contaminantes encapsulando el material residual y reducir la lixiviación. 
Equipos	
Entradas	NA
Salidas	Emisiones al aire Dioxido de carbono = $20704,12 \frac{mg}{mes}$ Niquel= $0,002356 \frac{mg}{mes}$ antimonio= $0,0038 \frac{mg}{mes}$ Arsenico= $0,001016 \frac{mg}{mes}$ Cadmio= $0,0021 \frac{mg}{mes}$ Cloro= $2,231 \frac{mg}{mes}$ Cromo= $0,0016 \frac{mg}{mes}$

Proceso unitario	Estabilización de cenizas
	Cobre= $0,0061 \frac{mg}{mes}$ Manganeso= $0,0025 \frac{mg}{mes}$ Mercurio= $0,00038 \frac{mg}{mes}$ Anomio= $1,425 \frac{mg}{mes}$ Flour= $0,086 \frac{mg}{mes}$ Oxido sulfurico= $1,0538 \frac{mg}{mes}$ HAV= $0,0030 \frac{mg}{mes}$ Zinc= $0,014 \frac{mg}{mes}$ Plomo= $0,00223 \frac{mg}{mes}$ Oxido nitrogeno= $55,78 \frac{mg}{mes}$ Talio= $0,0020 \frac{mg}{mes}$ Dioxinas= $4,92 \frac{mg}{mes}$

Proceso unitario	Separación
Descripción	la separación de los RSU se utiliza una planta mecanizada que opera mediante dos etapas, en primer lugar, se separan los residuos no ferrosos con una criba rotativa trommel, y posteriormente se separan los metales por la acción de la fuerza magnética  Fuente: [79]
Equipos	Pantalla Tromel Separador magnético
Entradas	- Electricidad - Pantalla Tromel $30 \text{ Kw} * \frac{\left(\frac{1KJ}{Seg}\right)}{1 \text{ Kw}} * \left(\frac{1Kwh}{3600KJ}\right) * \frac{(3600 \text{ seg} * 24 \text{ h} * 30 \text{ días})}{mes} = 21600 \frac{Kwh}{mes}$ - Separador magnético $6,6 \text{ Kw} * \frac{\left(\frac{1KJ}{Seg}\right)}{1 \text{ Kw}} * \left(\frac{1Kwh}{3600KJ}\right) * \frac{(3600 \text{ seg} * 24 \text{ h} * 30 \text{ días})}{mes} = 9504 \frac{Kwh}{mes}$
Salidas	Emisiones indirectas calculadas por el software Simapro 8.2

Proceso unitario	Compostaje
Descripción	El proceso del compostaje inicia desde que la madera cortada es distribuida en la aparte inferior de las hileras mediante un Amoladora. Encima de esta cama de madera será depositada la materia orgánica después de ser mezclada con los insumos en una barrena mezcladora. Cada ventana es volteada cada mes con el fin de airear las ventanas donde se realiza el compostaje y completar de manera efectiva el proceso del compostaje.  Fuente: [88]
Equipos	Pantalla Tromel Separador magnético
Entradas	- Wood Chips (madera cortada) $10,6 \frac{\text{Ton Madera}}{h} * \frac{24h}{1dia} * \left(\frac{30días}{1mes} \right) = 7632 \frac{\text{TonRSU}}{mes}$ - Diesel $2,06 \frac{L \text{ diesel}}{\text{TonRSU}} * 18385,46 \frac{\text{TonRSU}}{mes}$ $= 37874,04 \frac{L}{mes} * \left(\frac{1m^3}{1000L} \right) * 832 \frac{kg}{m^3}$ $= 31511,20 \frac{Kg}{mes} * \left(\frac{1Ton}{1000Kg} \right) = 31,511 \frac{\text{TonDiesel}}{mes}$ - Electricidad $19 \frac{kWh}{\text{TonRSU}} * 18385 \frac{\text{TonRSU}}{mes} = 349.315 \frac{kWh}{mes}$

Proceso unitario	Compostaje
Salidas	- Metano $4,8 \frac{Kg \text{ CH}_4}{TonRSU} * 18385,46 \frac{TonRSU}{mes} = 88250,2 \frac{Kg}{mes} * \left(\frac{1Ton}{1000Kg} \right)$ $= 88,25 \frac{Ton}{mes}$ - Monoxido de dinitrigeno $0,0165 \frac{Kg \text{ CH}_4}{TonRSU} * 18385,46 \frac{TonRSU}{mes} = 303,36 \frac{Kg}{mes} * \left(\frac{1Ton}{1000Kg} \right)$ $= 0,303 \frac{Ton}{mes}$ - COV (Compuestos Organicos Volatiles) $0,0139 \frac{Kg \text{ COV}}{TonRSU} * 18385,46 \frac{TonRSU}{mes} = 255,55 \frac{Kg}{mes} * \left(\frac{1Ton}{1000Kg} \right)$ $= 0,25 \frac{Ton}{mes}$ - Amonio $1,3 \frac{Kg \text{ NH}_3}{TonRSU} * 18385,46 \frac{TonRSU}{mes} = 23901,0 \frac{Kg}{mes} * \left(\frac{1Ton}{1000Kg} \right)$ $= 23,90 \frac{Ton}{mes}$

Anexo 5: Inventario de los escenarios 1

A continuación se muestran los datos de inventario de escenario 1 (Separación-Incineración-Relleno Sanitario) cuyas entradas en el software SimaPro se manejan en el idioma ingles por defeco.

- **Escenario 1**

Relleno Sanitario Doña Juana		
	Dato	Fuente
Entradas		
Pesaje		
Electricity, low voltage {RoW}I Market for I Alloc Def, S (kWh)	72	[1]
Distribución		
Diesel (Ton)	1,558	[60]
Compactación		
Diesel (Ton) Compactadora vibratoria CB-214C	2,396	[2]
Diesel (Ton) Bulldozer D8	10,782	[2]
Recubrimiento		
Soil (Ton)	220,880	[1]
Clay, Bentonite (Ton)	267,380	[1]
Organophosphorous compound, unspecified {GLO} I Market for I Alloc Def, S (Ton)	0,617	[2]
Diesel (Ton)	1,397	[3]
Planta de lixiviados		
Electricity, low voltage {RoW}I Market for I Alloc Def, S -(kWh)	352.800	[1]
Electricity, medium voltage {RoW}I Market for I Alloc Def, S (kWh)	24.170,2	[4]
Deshidratación de lodos		
Electricity, low voltage {RoW}I Market for I Alloc Def, S (kWh)	16.113,6	[5]
Electricity, medium voltage {RoW}I Market for I Alloc Def, S (kWh)	43.200	[6]
Biogas para uso		
Activated Carbon, at plant/RER mass	0,416	[65]
Polyethylen, high density, granulate {RoW}I production I Alloc Def, S	1,423	
Electricity, medium voltage {RoW}I Market for I Alloc Def, S (kWh)	4.320	
Electricity, medium voltage {RoW}I Market for I Alloc Def, S (kWh)	64.800	
Electricity, medium voltage {RoW}I Market for I Alloc Def, S (kWh)	144.000	
Salidas		
Emisiones al aire		
Degradación		

Relleno Sanitario Doña Juana		
	Dato	Fuente
Methane, biogenic (Ton)	2.087,73	[7]
Carbon Dioxide (Ton)	2.470,49	[7]
Nitrogen, atmospheric (Ton)	27,673	[7]
Quema		
Methane (Ton)	98,19	
Carbon Dioxide (Ton)	16.665,33	
Nitrogen dioxide (Ton)	0,188	
Vertimientos		
Planta de lixiviados		
Aluminium	0,1420	[5]
Arsemic	0,0004	[5]
Beryllium	0,000959	[5]
Cadmium	0,000191	[5]
Zinc	0,00740	[5]
Cobalt	0,002130	[5]
Copper	0,00383	[5]
BOD5, Biological oxygen demand	548,812	[5]
Iron	0,3675	[5]
Lithium	0,0017	[5]
Manganese	0,0036	[5]
Molybdenum	0,00049	[5]
Lead	0,0019	[5]
Nickel	0,00652	[5]

Incineración		
	Dato	Fuente
Entradas		
Tratamiento térmico		
Diesel (Ton)	21,95	[9]
Tap water {RoW} I market for I Alloc Def, S	14.257,33	[9]
Air (Ton)	452.267,36	[9]
Electricity, high voltage {RoW}I Market for I Alloc Def, S (kWh)	2.187.501,75	[9]
Tratamiento de gases		
Urea, as N {GLO} I Market for I Alloc Def, S (Ton)	53,92	[9]
Activated Carbon, at plant / RER mass (Ton)	48,351	[9]
Estabilización de ceniza		
Tap water {RoW} I market for I Alloc Def, S	14.929,2	[9]
Cement, unspecified {RoW} I Production I Alloc Def, S (Ton)	9.918,14	[9]

Incineración		
	Dato	Fuente
Separación magnética de escorias		
Electricity, low voltage {RoW}I Market for I Alloc Def, S (kWh)	51.829,19	[9]
Salidas		
Emisiones al aire		
Tratamiento de gases		
Carbon dioxide (Ton)	20.704,12	[9]
Nickel (Ton)	0,00235	[9]
Antimony (Ton)	0,00382	[9]
Arsenic (Ton)	0,00101	[9]
Cadmium (Ton)	0,0021	[9]
Chloride (Ton)	2,231	[9]
Chromium (Ton)	0,00163	[9]
Copper (Ton)	0,00619	[9]
Manganese (Ton)	0,00251	[9]
Mercury (Ton)	0,00038	[9]
Ammonia (Ton)	1,425	[9]
Fluoride (Ton)	0,086	[9]
Sulfur oxides (Ton)	1,053	[9]
Zinc (Ton)	0,0148	[9]
Hazardous Air Pollutants (HAP) (Ton)	0,0031	[9]
Nitrogen oxides (Ton)	55,78	[9]
Lead (Ton)	0,0223	[9]
Thallium (Ton)	0,00202	[9]
Dioxins (unspec.) (Ton)	4,9218	[9]
Tratamiento de cenizas		
Aluminium	1,60E-05	[10]
Arsenic	2,03E-05	[10]
Barium	0,00053	[10]
Calcium	0,00011	[10]
Chloride	9,20E-06	[10]
Carbon monoxide	5,966E-06	[10]
Chromium	7,253E-06	[10]
Copper	0,00043	[10]
Iron	5,61E-06	[10]
Potassium	0,00264	[10]
Lanthanum	6,960E-06	[10]
Magnesium	9,631E-06	[10]
Manganese	0,000344	[10]
Molybdenum	1,193E-05	[10]

Incineración		
	Dato	Fuente
Sodium	0,00400	[10]
Nickel	4,37E-05	[10]
Phosphorous	0,00263	[10]
Lead	0,0025	[10]
Antimony	0,00061	[10]
Silicon	2,65E-05	[10]
Strontium	0,00027	[10]
Titanium	5,182E-06	[10]
Vanadium	5,07E-05	[10]
Zinc	7,15E-06	[10]
Zirconium	8,64E-05	[10]
Separación magnética de escorias		
Zinc	2,75E-06	[10]
Lead	5,16E-07	[10]
Chromium	1,37E-06	[10]
Barium	6,88E-06	[10]
Antimony	3,44E-08	[10]
Copper	1,37E-06	[10]
Vanadium	2,06E-06	[10]
Nickel	1,37E-06	[10]
Arsenic	2,06E-07	[10]
Cobalt	6,88E-07	[10]
Separación		
Electricity, low voltage {RoW} Market for I Alloc Def, S (kWh)	15.806,744	[10]

Anexo 6: Inventario del escenario 2

Relleno Sanitario Doña Juana		
	Dato	Fuente
Entradas		
Pesaje		
Electricity, low voltage {RoW}I Market for I Alloc Def, S (kWh)	72	[1]
Distribución		
Diesel (Ton)	1,4667	[60]
Compactación		
Diesel (Ton) Compactadora vibratoria CB-214C	2,396	[2]
Diesel (Ton) Bulldozer D8	10,782	[2]
Recubrimiento		
Soil (Ton)	220,880	[1]
Clay, Bentonite (Ton)	267,380	[1]
Organophosphorous compound, unspecified {GLO} I Market for I Alloc Def, S (Ton)	0,617	[2]
Diesel (Ton)	1,397	[3]
Planta de lixiviados		
Electricity, low voltage {RoW}I Market for I Alloc Def, S (kWh)	352.800	[1]
Electricity, medium voltage {RoW}I Market for I Alloc Def, S (kWh)	24.170,2	[4]
Deshidratación de lodos		
Electricity, low voltage {RoW}I Market for I Alloc Def, S (kWh)	16.113,6	[5]
Electricity, medium voltage {RoW}I Market for I Alloc Def, S (kWh)	43.200	[6]
Biogas para uso		
Activated Carbon, at plant/RER mass	0,416	[65]
Polyethylen, high density, granulate {RoW}I production I Alloc Def, S	1,423	
Electricity, medium voltage {RoW}I Market for I Alloc Def, S (kWh)	4.320	
Electricity, medium voltage {RoW}I Market for I Alloc Def, S (kWh)	64.800	
Electricity, medium voltage {RoW}I Market for I Alloc Def, S (kWh)	144.000	
Salidas		
Emisiones al aire		
Degradación		
Methane, biogenic (Ton)	1.878,95	[7]
Carbon Dioxide (Ton)	2.223,44	[7]
Nitrogen, atmospheric (Ton)	24.903	[7]

Relleno Sanitario Doña Juana		
	Dato	Fuente
Quema		
Methane (Ton)	88,37	
Carbon Dioxide (Ton)	14.728	
Nitrogen dioxide (Ton)	0,169	
Vertimientos		
Planta de lixiviados		
Aluminium	0,127	[5]
Arsemic	0,00041	[5]
Beryllium	0,00086	[5]
Cadmium	0,00017	[5]
Zinc	0,00666	[5]
Cobalt	0,0019	[5]
Copper	0,0034	[5]
BOD5, Biological oxigen demand	99,393	[5]
Iron	3,3081	[5]
Lithium	0,0015	[5]
Manganese	0,0032	[5]
Molybdenum	0,0004	[5]
Lead	0,0017	[5]
Nickel	0,0058	[5]

Incineración		
	Dato	Fuente
Entradas		
Tratamiento térmico		
Diesel (Ton)	18,81	[9]
Tap water {RoW} I market for I Alloc Def, S	12.220,56	[9]
Air (Ton)	387.657,75	[9]
Electricity, high voltage {RoW}I Market for I Alloc Def, S (kWh)	1.875.001,56	[9]
Tratamiento de gases		
Urea, as N {GLO} I Market for I Alloc Def, S (Ton)	46,21	[9]
Activated Carbon, at plant / RER mass (Ton)	41,44	[9]
Estabilización de ceniza		
Tap water {RoW} I market for I Alloc Def, S	12.805,02	[9]
Cement, unspecified {RoW} I Production I Alloc Def, S (Ton)	8.501,12	[9]
Separación magnetica de escorias		
Electricity, low voltage {RoW}I Market for I Alloc Def, S (kWh)	51.829,19	[9]

Incineración		
	Dato	Fuente
Salidas		
Emisiones al aire		
Tratamiento de gases		
Carbon dioxide (Ton)	1,774E-05	[9]
Nickel (Ton)	2,014E-12	[9]
Antimony (Ton)	3,27E-12	[9]
Arsenic (Ton)	8,71E-13	[9]
Cadmium (Ton)	1,87E-12	[9]
Chloride (Ton)	1,91E-09	[9]
Chromium (Ton)	1,40E-12	[9]
Copper (Ton)	5,31E-12	[9]
Manganese (Ton)	2,15E-12	[9]
Mercury (Ton)	3,27E-13	[9]
Ammonia (Ton)	1,22E-09	[9]
Fluoride (Ton)	7,43E-11	[9]
Sulfur oxides (Ton)	9,03E-11	[9]
Zinc (Ton)	1,27E-11	[9]
Hazardous Air Pollutants (HAP) (Ton)	2,62E-12	[9]
Nitrogen oxides (Ton)	4,78E-08	[9]
Lead (Ton)	1,91E-11	[9]
Thallium (Ton)	1,73E-12	[9]
Dioxins (unspec.) (Ton)	4,21E-09	[9]
Tratamiento de cenizas		
Aluminium	1,379E-05	[10]
Arsenic	1,747E-05	[10]
Barium	4,619E-04	[10]
Calcium	7,887E-06	[10]
Chloride	5,114E-06	[10]
Carbon monoxide	6,217E-06	[10]
Chromium	3,754E-04	[10]
Copper	4,814E-06	[10]
Iron	2,265E-03	[10]
Potassium	5,966E-06	[10]
Lanthanum	8,255E-06	[10]
Magnesium	2,949E-04	[10]
Manganese	1,023E-05	[10]
Molybdenum	3,434E-03	[10]
Sodium	3,750E-05	[10]
Nickel	2,259E-03	[10]

Incineración		
	Dato	Fuente
Phosphorous	2,163E-03	[10]
Lead	5,250E-04	[10]
Antimony	2,275E-05	[10]
Silicon	2,369E-04	[10]
Strontium	4,442E-06	[10]
Titanium	4,346E-05	[10]
Vanadium	6,136E-06	[10]
Zinc	7,413E-05	[10]
Zirconium	1,024E-04	[10]
Separación magnética de escorias		
Zinc	2,36E-06	[10]
Lead	4,42E-07	[10]
Chromium	1,18E-06	[10]
Barium	5,90E-06	[10]
Antimony	2,95E-08	[10]
Copper	1,18E-06	[10]
Vanadium	1,77E-06	[10]
Nickel	1,18E-06	[10]
Arsenic	1,77E-07	[10]
Cobalt	5,90E-07	[10]
Separación		
Electricity, low voltage {RoW}I Market for I Alloc Def, S (kWh)	15.806,744	[10]