

**EVALUACIÓN DEL DIÓXIDO DE CARBONO (CO<sub>2</sub>) APLICANDO LA  
METODOLOGÍA ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV) EN EL RELLENO  
SANITARIO REGIONAL LA CORTADA, PAMPLONA, NORTE DE SANTANDER.**

**ING. RONALD JOSÉ LÓPEZ TORRADO**

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURAS PROGRAMA DE  
MAESTRIA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL  
PAMPLONA, COLOMBIA  
2018**

**EVALUACIÓN DEL DIÓXIDO DE CARBONO (CO<sub>2</sub>) APLICANDO LA  
METODOLOGÍA ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV) EN EL RELLENO  
SANITARIO REGIONAL LA CORTADA, PAMPLONA, NORTE DE SANTANDER.**

**ING. RONALD JOSÉ LÓPEZ TORRADO**

**Tesis de investigación para optar por el título de  
MAGISTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**Director**

**PhD OSCAR ORLANDO ORTIZ RODRÍGUEZ**

**Co-Director**

**PhD. RAQUEL AMANDA VILLAMIZAR**

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURAS PROGRAMA DE  
MAESTRIA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL  
PAMPLONA, COLOMBIA  
2018**

**NOTA DE ACEPTACION**

---

---

---

---

**JURADO**

---

**JURADO**

## DEDICATORIA

Esta tesis se la dedico a Dios quien supo guiarme por el buen camino, darme fuerzas para salir adelante y no desfallecer con los problemas que se presentaban.

A mi familia quienes por ellos soy lo que soy. Para mis padres Débora y José y hermanos María y Pablo por su apoyo, consejos, comprensión, amor y ayuda en los momentos difíciles y por ayudarme con los recursos necesarios para estudiar. Me han dado lo que soy como persona, forjando valores, carácter, empeño y perseverancia para lograr mis objetivos.

A ti Lucia, y a la pequeñita Luciana. tu ayuda y su compañía ha sido fundamental, has estado conmigo en los momentos más difíciles. Este proyecto no fue fácil, pero estuviste motivándome y ayudándome hasta donde tus alcances lo permitían. Te lo agradezco mucho amor.

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero dar las gracias por el desarrollo de mi tesis especialmente a mi tutor Oscar Ortiz, Profesores Jarol Ramón, Uriel Rivera, Saury Thomas, Ingeniero Alexander Araque, Ingeniero Wilmer Mantilla Velasco y todo el personal de apoyo en la Empresa Empopamplona quien me recibió con agrado y facilito de forma oportuna la información.

Igualmente, compañeros de trabajo Fernán Bonilla, John Caballero y Diego Díaz por su colaboración, consejos y ayuda en el proceso de elaboración de la investigación.

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	15
1. INTRODUCCIÓN.....	16
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	17
3. JUSTIFICACIÓN.....	18
4. OBJETIVOS.....	19
4.1 OBJETIVO GENERAL .....	19
4.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	19
5. CAPITULO I. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	20
5.1 ESTADO DEL ARTE .....	20
5.2 MARCO TEÓRICO.....	22
5.2.1 Análisis del Ciclo de Vida.....	22
5.2.1.1 Metodología del ACV .....	22
5.2.2.1.1 Definición de Objetivos y alcance del ACV .....	22
5.2.2.1.2 Análisis del Inventario (ICV).....	23
5.2.2.1.3 Evaluación de Impactos (EICV) .....	24
5.2.2.1.4 Interpretación de Resultados.....	24
5.2.2.2 Software para el desarrollo del ACV .....	25
5.2.2.3 Metodologías de Evaluación del Impacto de Ciclo de Vida.....	25
5.2.2.3.1 CML 2001 .....	26
5.2.2 Gases de efecto invernadero.....	26
5.2.3 Sistemas de disposición de residuos solidos.....	27
5.2.3.1 Origen .....	27
5.2.3.2 Tipos de sistemas de disposición.....	29
5.2.3.3 Tipos de vertedero .....	29
5.2.4 Gases de Vertedero.....	31
5.2.4.1 Factores de formación de los GEI .....	32
5.2.4.2 Fases generales en la generación de gases de vertedero.....	32
5.2.4.2.1 Fase I. Ajuste inicial.....	33

5.2.4.2.2 Fase II. Fase de transición .....	33
5.2.4.2.3 Fase III. Fase ácida .....	33
5.2.4.2.4 Fase IV. Fase de fermentación del metano .....	33
5.2.4.2.5 Fase V. Fase de maduración.....	34
5.3 MARCO LEGAL .....	35
5.4 MARCO CONTEXTUAL.....	36
6. CAPITULO II. CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS .....	39
6.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS .....	39
6.1.1 Metodología .....	39
6.1.1.1 Toma de información secundaria y determinación de muestras .....	40
6.1.1.2 Aplicación de la Teoría del Muestreo .....	40
6.1.1.3 Etapas de la caracterización: .....	43
6.1.1.3.1 Procedimiento para la toma de información .....	43
6.1.1.3.2 Recolección, transporte y acondicionamiento de muestras de Residuos Sólidos.....	44
6.1.1.3.3 Clasificación y Pesaje de los residuos sólidos de acuerdo a la normatividad RAS 2000.....	44
6.1.1.3.4 Sistematización de la información de campo.....	45
6.1.1.3.5 Elaboración de informe final del estudio de caracterización de Residuos Sólidos en el relleno regional "la Cortada" .....	45
6.1.2 Resultados de la Caracterización .....	45
6.1.2.1 Pamplona .....	45
6.1.2.1.1 Sector Especial.....	46
6.1.2.1.2 Sector Oficial .....	47
6.1.2.1.3 Sector Comercial .....	48
6.1.2.1.4 Pamplona, Ruta 1 .....	49
6.1.2.1.5 Pamplona, Ruta 2.....	50
6.1.2.2 Pamplonita .....	52
6.1.2.2.1 Pamplonita, Sector Oficial.....	52
6.1.2.2.2 Pamplonita, Estrato 1. ....	53
6.1.2.2.3 Pamplonita, Estrato 2. ....	54
6.1.2.2.4 Pamplonita, Estrato 3. ....	56
6.1.2.3 Chitagá.....	57
6.1.2.4 Silos. ....	58

6.1.2.4.1 Sector Oficial.....	58
6.1.2.4.2 Silos, Estrato 1.....	59
6.1.2.4.3 Silos, Estrato 2.....	60
6.1.2.5 Mutiscua.....	61
6.1.2.5.1 Mutiscua, Sector Oficial.....	61
6.1.2.5.2 Mutiscua, Estrato 1.....	62
6.1.2.5.3 Mutiscua, Estrato 2.....	63
6.1.2.6 Cácosta.....	64
6.1.2.6.1 Sector Oficial.....	64
6.1.2.6.2 Cácosta, Estrato 1.....	65
6.1.2.6.3 Cácosta, Estrato 2.....	66
7.  CAPITULO III. ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA.....	68
7.1 Fases del ACV.....	68
7.1.1 Definición del objetivo y el alcance.....	69
7.1.2 Análisis del inventario.....	69
7.1.3 Evaluación del impacto ambiental.....	73
7.1.4 interpretación.....	74
7.2 Modelación y simulación en el software LCA manager.....	74
7.2.1 Calentamiento Global.....	75
7.2.2 Destrucción de la capa de ozono.....	76
7.2.3 Toxicidad Humana.....	77
7.2.4 Uso del suelo.....	78
7.2.5 Ecotoxicidad Terrestre.....	79
7.3 Calentamiento Global IPCC.....	80
8.  CAPITULO IV. EVALUACIÓN DE CO <sub>2</sub> .....	85
8.1 Metodología de muestreo.....	85
8.1.1 Selección de sitios de monitoreo.....	86
8.1.2 Equipo de seguridad.....	87
8.1.3 Condiciones de las Chimeneas.....	87
8.1.4 Características del equipo.....	88
8.1.5 Toma de muestras.....	90
8.1.5.1 Toma de concentraciones de CO <sub>2</sub> .....	90
8.1.5.2 Toma de datos de caudal.....	91

8.2 Resultados del monitoreo.....	92
8.2.1 Análisis espacial del monitoreo de CO <sub>2</sub> .....	95
8.2.2 Análisis estadístico del monitoreo de CO <sub>2</sub> .....	101
8.3 Comparación entre el análisis de ciclo de vida (ACV), Método de Tchobanoglous-Theisen-Vigil y monitoreo de CO <sub>2</sub> .....	105
9. CONCLUSIONES .....	107
10. RECOMENDACIONES .....	109
11. REFERENCIAS.....	110
ANEXOS.....	114

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Permanencia de los GEI en la atmosfera según el GWP (gross warming potencial) .....	27
<b>Tabla 2</b> Composición típica encontrada en el gas de vertedero de residuos sólidos urbanos .....	31
<b>Tabla 3</b> Determinación de la muestra estadística municipio de Pamplona.....	41
<b>Tabla 4</b> Determinación de la muestra estadística municipio de Cácuta .....	42
<b>Tabla 5</b> Determinación de la muestra estadística municipio de Chitagá .....	42
<b>Tabla 6</b> Determinación de la muestra estadística municipio de Mutiscua.....	42
<b>Tabla 7</b> Determinación de la muestra estadística municipio de Silos .....	43
<b>Tabla 8</b> Determinación de la muestra estadística municipio de Pamplonita.....	43
<b>Tabla 9</b> Entrada en Toneladas de residuos sólidos al relleno sanitario regional La Cortada. ....	71
<b>Tabla 10</b> Inventario de fuentes primarias y secundarias para el Servicio de Aseo. Caracterización 2017 .....	71
<b>Tabla 11</b> Ubicación de las chimeneas.....	86
<b>Tabla 12</b> Descripción del equipo de muestreo.....	89
<b>Tabla 13</b> Resultados del muestreo día lunes 8:00 am .....	92
<b>Tabla 14</b> Resultados del muestreo día lunes 1:00 pm .....	92
<b>Tabla 15</b> Resultados del muestreo día lunes 3:00 pm .....	93
<b>Tabla 16</b> Estadística descriptiva de concentraciones de CO <sub>2</sub> , carga contaminante y Temperatura.....	102
<b>Tabla 17</b> Análisis de correlación-Concentraciones horarias de CO <sub>2</sub> .....	102
<b>Tabla 18</b> Análisis de correlación-Concentraciones de CO <sub>2</sub> , carga contaminante y Temperatura.....	103
<b>Tabla 19.</b> Comparación metodologías determinación de CO <sub>2</sub> .....	106

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Diagrama EICV .....	24
<b>Figura 2</b> Fases generales en la generación de gases de vertedero .....	34
<b>Figura 3</b> Localización general del relleno sanitario regional La Cortada.....	36
<b>Figura 4</b> Relleno sanitario regional La Cortada y puntos de muestro de CO <sub>2</sub> .....	38
<b>Figura 5</b> Metodología general para la caracterización de residuos solidos.....	39
<b>Figura 6</b> Composición Porcentual de la muestra sector especial municipio de Pamplona.....	46
<b>Figura 7</b> Distribución porcentual de plásticos sector especial municipio de Pamplona.....	46
<b>Figura 8</b> Composición Porcentual de la muestra sector oficial municipio de Pamplona.....	47
<b>Figura 9</b> Distribución porcentual de plásticos sector oficial municipio de Pamplona.....	48
<b>Figura 10</b> Composición Porcentual de la muestra sector comercial municipio de Pamplona.....	48
<b>Figura 11</b> Distribución porcentual de plásticos sector comercio municipio de Pamplona.....	49
<b>Figura 12</b> Composición Porcentual de la muestra Ruta 1 municipio de Pamplona.....	49
<b>Figura 13</b> Distribución porcentual de plásticos sector ruta 1 municipio de Pamplona.....	50
<b>Figura 14</b> Composición Porcentual de la muestra sector oficial municipio de Pamplona.....	51
<b>Figura 15</b> Distribución porcentual de plásticos sector Ruta 2 municipio de Pamplona.....	51
<b>Figura 16</b> Composición Porcentual de la muestra sector oficial municipio de Pamplonita.....	52
<b>Figura 17</b> Distribución porcentual de plásticos sector oficial municipio de Pamplonita.....	53
<b>Figura 18</b> Composición Porcentual de la muestra Estrato 1 municipio de Pamplonita.....	53
<b>Figura 19</b> Distribución porcentual de plásticos sector estrato 1 municipio de Pamplonita.....	54
<b>Figura 20</b> Composición Porcentual de la muestra sector estrato 2 municipio de Pamplonita.....	55
<b>Figura 21</b> Distribución porcentual de plásticos sector estrato 2 municipio de Pamplonita.....	55
<b>Figura 22</b> Composición Porcentual de la muestra sector estrato 3 municipio de Pamplonita.....	56
<b>Figura 23</b> Distribución porcentual de plásticos sector estrato 3 municipio de Pamplonita.....	56

<b>Figura 24</b> Composición Porcentual de la muestra estrato 2 municipio de Chitagá.	57
<b>Figura 25</b> Distribución porcentual de plásticos estrato 2 en el municipio de Chitagá.	58
<b>Figura 26</b> Composición Porcentual de la muestra sector oficial municipio de Silos.	58
<b>Figura 27</b> Distribución porcentual de plásticos sector oficial municipio de Silos.	59
<b>Figura 28</b> Composición Porcentual de la muestra sector Estrato 1 municipio de Silos.	59
<b>Figura 29</b> Distribución porcentual de plásticos sector estrato 1 municipio de Silos.	60
<b>Figura 30</b> Composición Porcentual de la muestra Estrato 2 municipio de Silos.	60
<b>Figura 31</b> Distribución porcentual de plásticos sector estrato 2 municipio de Silos.	61
<b>Figura 32</b> Composición Porcentual de la muestra sector oficial municipio de Mutiscua.	61
<b>Figura 33</b> Distribución porcentual de plásticos sector oficial municipio de Mutiscua.	62
<b>Figura 34</b> Composición Porcentual de la muestra Estrato 1 municipio de Mutiscua.	62
<b>Figura 35</b> Distribución porcentual de plásticos sector estrato 1 municipio de Mutiscua.	63
<b>Figura 36</b> Composición Porcentual de la muestra sector Estrato 2 de Mutiscua.	63
<b>Figura 37</b> Distribución porcentual de plásticos sector estrato 2 municipio de Mutiscua.	64
<b>Figura 38</b> Composición Porcentual de la muestra sector oficial municipio de Cácuta.	64
<b>Figura 39</b> Distribución porcentual de plásticos sector oficial municipio de Cácuta.	65
<b>Figura 40</b> Composición Porcentual de la muestra Estrato 1 municipio de Cacota.	65
<b>Figura 41</b> Distribución porcentual de plásticos sector estrato 1 municipio de Cácuta.	66
<b>Figura 42</b> Composición Porcentual de la muestra Estrato 2 municipio de Cácuta.	66
<b>Figura 43</b> Distribución porcentual de plásticos sector estrato 2 municipio de Cácuta.	67
<b>Figura 44</b> Metodología general para el análisis de ciclo de vida.	68
<b>Figura 45</b> Análisis de inventario del proceso de aseo.	70
<b>Figura 46</b> CML 2001-Calentamiento global (Kg CO <sub>2</sub> eq).	75
<b>Figura 47</b> CML 2001-Destrucción capa de ozono (Kg CFC-11 eq).	76
<b>Figura 48</b> CML 2001-Toxicidad humana (Kg 1,4-DCB eq).	77
<b>Figura 49</b> CML 2001-Uso del suelo (m <sup>2</sup> a).	78
<b>Figura 50</b> CML 2001-Ecotoxicidad terrestre (Kg 1,4-DCB eq).	79
<b>Figura 51</b> CML 2001-Calentamiento global (Kg CO <sub>2</sub> eq.).	80
<b>Figura 52</b> IPCC 2007-Calentamiento global (Kg CO <sub>2</sub> eq.).	80

<b>Figura 53</b> IPCC 2013-Calentamiento global (Kg CO <sub>2</sub> eq.).....	81
<b>Figura 54</b> CML 2001-Eutrofizacion (Kg PO <sub>4</sub> eq) .....	82
<b>Figura 56</b> Perfil ambiental de comparación de metodologías CML 2001-IPCC 2007-IPCC 2013.....	83
<b>Figura 55</b> CML 2001-Oxidacion fotoquímica (Kg etileno eq.) .....	83
<b>Figura 57</b> Perfil ambiental de los impactos generados por los residuos sólidos. ..	84
<b>Figura 58</b> Metodología general para la evaluación de CO <sub>2</sub> .....	85
<b>Figura 59</b> Diseño de Chimenea #6.....	87
<b>Figura 60</b> Residuos alrededor de la Chimenea #2 .....	88
<b>Figura 61</b> Medidor de CO <sub>2</sub> .....	89
<b>Figura 62</b> Toma de concentraciones de CO <sub>2</sub> .....	90
<b>Figura 63</b> Toma de caudal .....	91
<b>Figura 64</b> Llenado de la bolsa .....	91
<b>Figura 65</b> Comportamiento de la producción semana en el punto 1. ....	94
<b>Figura 66</b> Comportamiento de la producción semanal en los puntos 3, 4, 5 y 6 ...	94
<b>Figura 67</b> Comportamiento de la producción semana en el punto 9. ....	95
<b>Figura 68</b> Concentraciones de CO <sub>2</sub> diario.....	96
<b>Figura 69</b> Concentraciones de CO <sub>2</sub> monitoreo 8:00 am .....	97
<b>Figura 70</b> Concentraciones de CO <sub>2</sub> monitoreo 1:00 pm .....	98
<b>Figura 71</b> Concentraciones de CO <sub>2</sub> monitoreo 3:00 pm.....	99
<b>Figura 72</b> Concentraciones de carga contaminante de CO <sub>2</sub> .....	100
<b>Figura 73</b> Valores de Temperatura (°C) registrados en el relleno sanitario regional "La Cortada" .....	101
<b>Figura 74</b> Concentraciones de CO <sub>2</sub> registradas durante el periodo de monitoreo .....	104
<b>Figura 75</b> Relación entre concentraciones de CO <sub>2</sub> y carga contaminante .....	105

## LISTA DE ANEXOS

<b>ANEXO A.</b> Registro Fotográfico.....	114
<b>ANEXO B.</b> Formato de Caracterización de residuos sólidos-Empopamplona .	116
<b>ANEXO C.</b> Base de datos.	

## **RESUMEN**

El presente estudio se propuso con el fin de realizar una aproximación proactiva hacia el control y seguimiento del gas de efecto invernadero dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) emitido por la descomposición de los residuos sólidos por medio de diferentes metodologías y cuantificar los impactos que representa este proceso en el medio ambiente mediante el análisis de ciclo de vida para el relleno sanitario regional La Cortada de la empresa de servicios públicos del municipio de Pamplona Empopamplona. Para ello, se realizó inicialmente la caracterización física de los residuos sólidos generados en el municipio y dispuestos en el relleno sanitario. Luego, se cuantificaron las entradas y salidas de los residuos sólidos para diagnosticar la problemática del relleno bajo un análisis del ciclo de vida. Posteriormente, se realizó el monitoreo de CO<sub>2</sub> y caudal de gas, para las chimeneas ubicadas en el relleno con el fin de estimar la carga contaminante emitida durante una semana. Los resultados demuestran que el relleno sanitario tiene una carga contaminante de 165.49 kg CO<sub>2</sub> eq. al año producto de la descomposición de los residuos sólidos dispuestos. El impacto de estos productos en los rellenos sanitarios puede ser solucionado direccionando todo el ciclo de vida, el cual incluye canales de distribución, almacenamiento, reciclaje y reutilización.

### **Palabras Clave:**

Análisis del ciclo de vida, Biogás, Relleno sanitario, Sostenibilidad.

## 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años las empresas de servicios públicos han mostrado gran preocupación por aspectos tan importantes para el medio ambiente como lo son producción de energía y contaminación. La actividad antropogénica genera un impacto drástico en los diferentes medios producto del consumo excesivo y la explotación de los recursos naturales conllevando a una producción inmensurable de residuos sólidos disminuyendo la capacidad de los rellenos sanitarios y aumentando las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera.

Actualmente presentan diferentes alternativas para mitigar los impactos que se generan por la producción y disposición final de residuos sólidos, como por ejemplo la generación de energía eléctrica a partir de los gases de la descomposición de los residuos en los rellenos sanitarios, la generación de biomasa a partir de residuos sólidos orgánicos o la utilización de instalaciones recuperadoras de materiales para el aprovechamiento de los residuos sólidos.

El análisis del ciclo de vida se ha convertido en una herramienta para estudiar los impactos ambientales generados por actividades y procesos industriales, tales como el sistema de aseo, resaltando la importancia de la operación de vertederos o rellenos sanitarios. Por lo anterior, el análisis del ciclo de vida en la operación del servicio de aseo en Pamplona, Norte de Santander, es una alternativa que se plantea con el fin de aplicar y proponer estrategias más sostenibles y comprometidas con el medio ambiente.

La presente investigación está estructurada por cuatro capítulos. El capítulo I comprende la fundamentación teórica respecto al análisis del ciclo de vida y los sistemas de disposición final de residuos sólidos o rellenos sanitarios, además de los antecedentes que soportan la problemática planteada y la normatividad aplicable. El capítulo II contiene la caracterización física de los residuos sólidos en el municipio de Pamplona. El capítulo III abarca el análisis del ciclo de vida aplicado al relleno sanitario regional La Cortada y finalmente, el capítulo IV presenta la evaluación del dióxido de carbono generado en el relleno sanitario La Cortada.

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los principales problemas ambientales que se derivan del proceso de disposición final de los residuos sólidos en los rellenos sanitarios están relacionados con el escape incontrolado de los gases que pueden causar olores y otras condiciones potencialmente peligrosas para la salud humana, el manejo inadecuado de lixiviado que puede afectar aguas subterráneas o superficiales, la reproducción y proliferación de vectores y el impacto de la descarga de gases de efecto invernadero a la atmosfera. (Tchobanoglous, 1994).

Los rellenos sanitarios son sistemas dinámicos en generación de gases de efecto invernadero, pues una vez dispuestos los residuos sólidos atraviesan un proceso de degradación mediante el cual se producen diferentes gases como el  $\text{CO}_2$  y el  $\text{CH}_4$ , que son considerados los de mayor contribución al calentamiento global. Además, el sistema tiene la capacidad de contaminar durante toda su vida útil sin que se ejerza mayor control y regulación en los procesos que generan la emisión de estos gases.

El presente proyecto se desarrolló basándose en el efecto que tiene la operación del relleno sanitario regional La Cortada sobre la contaminación en la atmosfera, proveniente de gases de efecto invernadero que se generan por los procesos de transformación o degradación de los residuos sólidos que se disponen diariamente en el relleno sanitario. En este contexto, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál es la capacidad de generación de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) que contribuye al calentamiento global en el relleno sanitario regional La cortada?

### 3. JUSTIFICACIÓN

Es importante para la sociedad desde el punto de vista ambiental conocer y cuantificar las cargas de contaminación emitidas por cualquier proceso industrial o cualquier actividad que pueda generar impactos negativos en el medio ambiente, por este motivo se hace indispensable para Pamplona determinar la producción de gases efecto invernadero como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en el relleno sanitario La Cortada.

Por tanto, se hace necesario un estudio de Análisis de Ciclo de vida para determinar técnicas de optimización y estrategias en el sistema de distribución, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos en el relleno para minimizar el impacto en el medio ambiente y en la comunidad en general.

De acuerdo a las condiciones actuales de los rellenos sanitarios se debe proponer alternativas de utilización de los gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono y metano para su utilización como fuentes de energía alternativa que conlleven a generar disminución en la contaminación ambiental y contribuir a la generación de energía; por consiguiente estableciendo una actividad innovadora en busca del desarrollo sostenible.

## **4. OBJETIVOS**

### **4.1 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) aplicando el análisis del ciclo de vida en el relleno sanitario regional “La Cortada” del municipio de Pamplona, Norte de Santander.

### **4.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Identificar los fundamentos teóricos de la generación de gases de efecto invernadero en rellenos sanitarios y el análisis del ciclo de vida (ACV).
- Realizar la caracterización física de los residuos sólidos del municipio de Pamplona.
- Implementar la metodología de Análisis del Ciclo de Vida para el relleno sanitario regional La Cortada.
- Evaluar el Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) generado en el relleno sanitario regional La Cortada.

## 5. CAPITULO I. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 5.1 ESTADO DEL ARTE

Las contribuciones más importantes hechas sobre ACV se publicaron en el Journal Energy Policy entre los años 1974 – 1975, y posteriormente se compilaron en un libro de J.A.G. Thomas en 1977, titulado Análisis de energía (Energy analysis). En 13 1975, William Franklin fundó junto con Marge Franklin una de las empresas líderes en ACV de Estados Unidos, la firma Franklin Associates; la cual llevó a cabo algo más de 60 estudios, principalmente para compañías del sector privado (Ayres, 1995). Hacia 1971, la Universidad de Illinois y la Universidad de Stanford, de manera independiente, empezaron a estudiar el ACV. En ambas universidades la atención se centró en estudiar aspectos de consumo de energía de botellas para bebidas (Chacón Vargas, 2008). Por otro lado P. Papanek publicó el libro Design for real world: human ecology and social change, en el que se incorpora el pensamiento de ciclo de vida en el diseño de productos, teniendo en cuenta aspectos adicionales al diseño como su función, su utilidad, reparabilidad, asequibilidad e impactos sociales y ambientales (Lewis et al., 2001).

En Europa en 1972, Boustead calculó la energía total usada en varios tipos de envases de bebidas, incluyendo vidrio, plástico, metal y aluminio; procedimiento denominado “Ecobalance” (Islam, Jollands y Setunge, 2015).

En 1993 la Sociedad de Toxicología Ambiental y Química formuló el primer código internacional: Código de prácticas para el ACV, con el fin de homogeneizar los diversos estudios realizados. Posteriormente, la Organización Internacional para la Estandarización (ISO) apoyó este desarrollo para establecer la estructura de trabajo, uniformizar los métodos, los procedimientos y la terminología (Romero, 2003). Para el mismo año (1993), la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los EEUU publicó el “Life Cycle Design Guidance Manual”, el cual fue el primer documento donde se consideran las fases de diseño del Análisis de Ciclo de Vida y todas las repercusiones medioambientales que esta nueva propuesta trae a lo largo de sus fases de desarrollo. Este manual es una recopilación de los resultados de una investigación bibliográfica y entrevistas con profesionales sobre metodologías de diseño de productos (Astrup Jensen, Hoffman, T. Moller, y Schimidt, 1997). Fue en el año de 1997 cuando finalmente se publicó la primera norma internacional de la serie ISO 14040 sobre ACV, titulada “Environmental Management –Life Cycle Assessment-Principles and Framework”, del Comité Técnico de la ISO (TC-207) fue quien dio origen a esta norma (Chacón V, 2008).

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es un tema que ha venido evolucionando dentro del marco de la sostenibilidad y la producción más limpia. En el informe Los límites del crecimiento, publicado en 1972 por Meadows, Dennis L. Meadows, Randers y

Behrens III, y auspiciado por el Club de Roma, se habló sobre el crecimiento rápido de la población mundial y las incidencias negativas que ésta tenía sobre las materias primas y recursos energéticos finitos, y que despertó una mayor conciencia e interés por la protección del medio ambiente después de la crisis del petróleo. En este mismo año, surgió la conferencia de las Naciones Unidas sobre Ambiente Humano, el cual fue uno de los primeros escenarios internacionales para la discusión sobre protección ambiental, crecimiento y desarrollo económico, que sentó parte de las bases que plantearon posteriormente de manera formal en el Informe Brundtland de 1987, "Nuestro Futuro Común", en el cual se definió el concepto de Desarrollo Sostenible como política ambiental global para enfrentar los problemas ambientales mundiales, regionales y locales que afrontaba y sigue afrontando el planeta, y que luego se presentó y discutió ampliamente en la cumbre de Rio de 1992 (Chacón V, 2008).

Respecto al análisis en rellenos sanitarios, Aguilar et al. (2010), cuantificaron los componentes de los residuos sólidos domésticos susceptibles de ser reciclados, depositados en el relleno sanitario de la ciudad de Ensenada, México, para ser valorizados en el mercado de los reciclables, una opción sustentable para su aprovechamiento.

Para el caso particular de Colombia, la aplicación de las metodologías de ACV, se iniciaron en la Universidad de los Andes en Bogotá y la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB) en Medellín. Los primeros trabajos y talleres sobre ACV surgieron a partir de 1997 cuando se crearon en el Instituto Colombiano de Normas Técnicas 14 y Certificación (ICONTEC) los Comités Técnicos de Normalización Espejos del ISO/TC-207 para discutir y homologar a normas nacionales la serie de estándares internacionales de la familia ISO 14000, entre ellas la serie ISO 14040 sobre ACV. (Chacón Vargas, 2008).

Actualmente se han realizado estudios en diversos sectores industriales: azucarero, cafetero y floricultor, fabricación de empaques, producción de agroquímicos y detergentes, producción de grifería y jeringas, fabricación de autopartes y maquinaria, proyectos de ingeniería civil, producción de guantes de látex y empresas de servicios públicos. (Chacón Vargas, 2008).

Por otra parte, Pinzón, L (2010) realizó un análisis sobre la influencia de los rellenos sanitarios en el cambio climático, haciendo referencia a uno de los factores que de manera invisible hace un gran aporte a la generación de los llamados Gases de Efecto Invernadero (los rellenos sanitarios, sitios encargados de la disposición final de los residuos sólidos).

## **5.2 MARCO TEÓRICO**

### **5.2.1 Análisis del Ciclo de Vida**

El Análisis de ciclo de vida (ACV) es un marco metodológico para la estimación y evaluación de los impactos ambientales atribuibles al ciclo de vida de un producto, tales como el cambio climático, el agotamiento del ozono estratosférico, la creación de ozono troposférico (smog), la eutrofización, la acidificación, el estrés toxicológico en humanos la salud y los ecosistemas, el agotamiento de los recursos, el uso del agua, uso de la tierra, y el ruido ya otros (Rebitzer et al., 2004).

La ISO define el Análisis de Ciclo de Vida como una herramienta para evaluar los impactos potenciales sobre el medio ambiente y los recursos utilizados en todo el ciclo de vida de un producto, es decir, desde la adquisición de materias primas, a través de las fases de producción y el uso, hasta la gestión de residuos. La fase de gestión de residuos incluye la disposición, así como el reciclaje. El término "producto" incluye tanto los bienes como los servicios. El ACV se denomina como una evaluación integral y considera todos los atributos o aspectos del medio ambiente natural, la salud humana y otros recursos (ISO 14040, 2007).

#### **5.2.1.1 Metodología del ACV**

El análisis de Ciclo de Vida se podrá desarrollar para un proceso, un servicio o una actividad, debiendo ser consideradas en cualquiera de los casos todas las etapas que constituyen su vida útil. (Cámbara, 2012).

De acuerdo con SETAC (1993), para realizar el ACV se deben evaluar de forma objetiva las cargas ambientales, asociadas a un producto, proceso o actividad, para lo cual se deberá:

- identificar y cuantificar tanto el uso de materia y energía como los vertidos, de cualquier clase, al medio ambiente.
- Determinar el impacto que el uso de la materia y energía y de los vertidos provocan en el medio ambiente.
- Evaluar y extraer conclusiones para realizar mejoras ambientales o elegir la mejor de las opciones posibles desde el punto de vista ambiental.

#### **5.2.2.1.1 Definición de Objetivos y alcance del ACV**

El primer paso es definir el objetivo, seguidamente se establece el balance. En este paso debe establecerse de forma adecuada el sistema o sistemas a estudiar

y sus límites, así como las necesidades de datos e información, las hipótesis que se establezcan de partida y el nivel de detalle que se pretende alcanzar durante la realización del estudio. considerar aspectos como el ámbito geográfico y temporal, los procesos que se van a considerar dentro del estudio.

El alcance quedara definido por:

- Producto al que se aplicara el estudio, explicando sus características.
- Los límites del sistema que demarcan las operaciones a incluir para la toma de datos.
- Definición de las entradas y salidas del sistema que sean objeto de evaluación.

Los límites del sistema vendrán determinados por varios factores, en ocasiones por la aplicación prevista para el estudio, por los recursos económicos para la realización del mismo, por la disponibilidad de información, las hipótesis planteadas, etc. Se pueden marcar los limites por geografía, temporalidad o por exclusión de etapas del proceso.

#### **5.2.2.1.2 Análisis del Inventario (ICV)**

El ACV de un producto es una serie de procesos y sistemas conectados para la obtención de un producto o servicio final. El análisis de inventario es la fase del ACV que ha experimentado un mayor desarrollo.

El análisis del inventario es una lista cuantificada de todos los flujos entrantes y salientes del sistema durante toda su vida útil, los cuales son extraídos del ambiente natural o bien emitidos en él, calculando los requerimientos energéticos y materiales del sistema y la eficiencia energética de sus componentes, así como las emisiones producidas en cada uno de los procesos y sistemas.

Según la ISO 14040, el análisis de inventario del ciclo de vida comprende la obtención de datos y los procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas y salidas relevantes de un sistema, tomando como referencia la unidad funciona. Esas entradas y salidas pueden incluir el uso de recursos y las emisiones al aire, agua y suelo asociadas con el sistema a lo largo del ciclo de vida, es decir, desde la extracción de las materias primas hasta la disposición final.

La recogida de datos es la labor más exigente, los datos se pueden dividir en dos grupos:

- Datos de Primer Plano. Específicos del sistema
  - o Se recopilan mediante cuestionarios.

A considerar:

- o Dependencia de la obtención de datos de la relación mantenida.

- Se ha de tener presente la confidencialidad de los datos.
- La terminología puede variar en diversos sectores.
- Datos de fondo. Se corresponde con materiales generales, transporte, etc.

ISO recomienda los siguientes criterios, con preferencia según este orden:

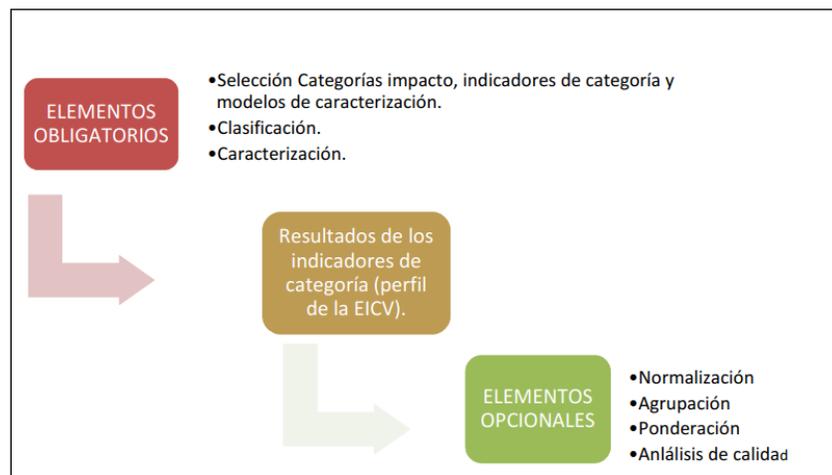
- Evitar el problema dividiendo el proceso en uno por cada salida.
- Extender los límites del sistema de forma que incluya un proceso que pueda ser modelado aparte y luego restado.
- Cuando no sean posible ninguna de las opciones anteriores, se permite realizar por la valoración económica de la salida.

### 5.2.2.1.3 Evaluación de Impactos (EICV)

La evaluación del impacto del ciclo de vida es un proceso técnico para la caracterización y el análisis de las cargas ambientales identificadas en el inventario. Implica la asociación de datos del inventario con impactos ambientales específicos tratando de valorar dichos impactos.

En la Figura 1 Se recogen los elementos que configuran el EICV agrupados en dos bloques, los obligatorios y los opcionales.

**Figura 1** Diagrama EICV



**Fuente:** Cámara, 2012.

### 5.2.2.1.4 Interpretación de Resultados

El último paso del ciclo de vida consiste en interpretar los resultados de las fases precedentes, combinando los resultados del análisis de inventario con la

evaluación de impacto y evaluarlos juntos, en un modo congruente con los objetivos definidos en el estudio, a fin de establecer las conclusiones y recomendaciones para la toma de decisiones. En esta fase se detectan las etapas críticas del ciclo de vida del producto, proceso o servicio sobre el que se ha realizado el estudio, mostrando los puntos de mayor peso medio ambiental y en consecuencia permitir tomar medidas correctoras o decisiones estratégicas.

Una posible estructura de contenido es:

- Identificación de asuntos significativos tales como datos de inventario.
- Evaluación: verificación, estudios de sensibilidad y coherencia.
- Exposición final de las conclusiones, posibles limitaciones y recomendaciones.

#### **5.2.2.2 Software para el desarrollo del ACV**

Debido a la complejidad de los cálculos y aprovechando los desarrollos tecnológicos, en los últimos años se han desarrollado herramientas de software, basadas en la fase de EICV del ACV, para realizar toda la fase posterior al inventario. Estos programas, en su mayoría, tienen incorporadas bases de datos, residiendo su principal diferencia en la BBDV que incorporan y las metodologías de EICV que utilizan para la obtención de los datos finales del ACV.

Para el caso de las metodologías de EICV, es recomendable que la herramienta sea capaz de trabajar con varias de ellas. Con esto se pretende:

- Obtener resultados concretos a través de una metodología específica, como el cálculo de la huella de carbono a través de la metodología IPCC3.
- Comparar los resultados que proporcionan diferentes metodologías para el cálculo del mismo impacto ambiental. Por medio de esta comparativa se puede enriquecer la interpretación de los resultados y permite evaluar la idoneidad o no de una metodología u otra.
- Manejar resultados tanto específicos como generales, como por ejemplo obtener resultados sobre el “consumo de energía” y las “emisiones de Kg eq. CO<sub>2</sub>” por un lado, y por otro la carga ambiental del sistema analizado en “puntos”.

#### **5.2.2.3 Metodologías de Evaluación del Impacto de Ciclo de Vida**

Existen diferentes metodologías para la evaluación del ciclo de vida, centrándose sus principales diferencias por una primera fase en las categorías de impacto seleccionadas y la caracterización de los elementos del inventario. En una segunda fase se diferencian por la normalización y ponderación empleada.

### **5.2.2.3.1 CML 2001**

Con origen en una de las primeras metodologías de ACV, el CML 1992, el paso de la normalización es opcional para ACV simplificados, dispone de valores de referencia para la normalización de indicadores de las categorías de impacto. Se propone una lista de categorías de impacto clasificados en tres grupos según su obligatoriedad o no ser incluidas en el desarrollo del ACV según el tipo y finalidad del estudio.

Su objetivo es proporcionar las mejores prácticas para indicadores del tipo “midpoint”, de acuerdo al estándar ISO 14040. La metodología incluye la normalización, pero no la ponderación.

Las categorías de impacto ambiental incluidas son:

- Agotamiento de los recursos abióticos.
- Cambio climático.
- Destrucción de la capa de ozono.
- Toxicidad humana.
- Ecotoxicidad humana.
- Uso de recursos.

### **5.2.2 Gases de efecto invernadero**

Entre los gases efecto invernadero GEI se incluyen las emisiones antropogénicas de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), emitido principalmente por el consumo de combustibles fósiles para generar energía (carbón, petróleo y sus derivados, y gas natural), por la tala y quema de bosques, y por algunos procesos industriales como la fabricación del cemento; el metano ( $\text{CH}_4$ ) y el óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), son emitidos por actividades agrícolas (especialmente por la aplicación de fertilizantes y por cultivos de arroz bajo riego), cambios en el uso de la tierra y por vertederos sanitarios y aguas residuales; hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC), hexafluoruro de azufre ( $\text{SF}_6$ ), hidroclorofluorocarbonos (HCFC), clorofluorocarbonos (CFC), el precursor de aerosoles y los gases químicamente activos dióxido de azufre, ( $\text{SO}_2$ ), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), y compuestos orgánicos volátiles distintos del metano (COVDM) (que son precursores de ozono y de gases de efecto invernadero directo), son emitidos en un gran porcentaje por el sector transporte. (Pinzón, 2010).

De los anteriores se ha podido determinar que el metano ( $\text{CH}_4$ ) es uno de los compuestos más contaminantes asociado con el efecto invernadero, por lo tanto, sus estrategias para la reducción de sus emisiones, ofrece un mecanismo eficiente de mitigación del calentamiento global, que representa cerca del 18% de los gases de efecto invernadero. La concentración de metano en la atmósfera se ha

incrementado alrededor de 0.6%/año, lo que representa actualmente más del doble en los últimos doscientos años, en contraste con el bióxido de carbono, que incrementa su concentración en la atmósfera alrededor de 0.4%/año. Las emisiones de metano a nivel mundial asociadas al vertido de residuos han sido estimadas por la EPA entre 22 y 46 millones de toneladas por año, con una media de 34 millones de toneladas por año.

El metano tiene una vida media de doce años en la atmósfera, mientras que el bióxido de carbono permanece más de 120 años; así, que el metano con su alto poder de absorción las radiaciones y su vida corta, hace que tenga un impacto inmediato en el cambio climático. También, el biogás generado puede generar riesgo de explosión, incendio e intoxicación según sea la caracterización del mismo y el tiempo de exposición. En cuanto a la permanencia en el tiempo de los GEI se estima que el tiempo de vida en la atmosfera para estos se extiende desde los 15 años para el metano CH<sub>4</sub> y los 120 años para el óxido nitroso N<sub>2</sub>O, mientras que para el dióxido de carbono CO<sub>2</sub> está entre los 100 y 150 años. (Tabla 1) La importancia de la recolección y equivalencia a CO<sub>2</sub>, y su incidencia en el calentamiento global por su carácter de gas de efecto invernadero, se deduce del GWP (gross warming potencial). (Pinzón, 2010).

**Tabla 1** Permanencia de los GEI en la atmosfera según el GWP (gross warming potencial)

<b>Gas</b>	<b>Tiempo de vida en la atmosfera (años)</b>	<b>GWP, horizonte de 90 años</b>
CO <sub>2</sub>	50-100	1
CH <sub>4</sub>	12	21
N <sub>2</sub> O	104	296-39
Perclorofluorocarbonados		6500
Hidroclorofluorocarbonados		12,000
SF <sub>6</sub>	3,200	22,200

**Fuente:** Pinzón U, 2010.

## **5.2.3 Sistemas de disposición de residuos solidos**

### **5.2.3.1 Origen**

Durante siglos el hombre basó su dieta alimenticia en la recolección de gran variedad de especies vegetales de fácil asimilación y descomposición, así como

se proveyó de bienes y herramientas de origen natural (madera, cuero, hueso, algodón, etc.) con escaso proceso de transformación, lo que hacía que la generación de residuos fuera escasa, haciendo que estos fueran fácilmente manejables donde su disposición se hacía como alimento para ganado y los sobrantes eran dispuestos en la naturaleza para su reincorporación natural. Con el paso del tiempo el hombre deja de movilizarse y ser recolector, buscando la forma de obtener sus alimentos de una manera fácil y organizada, buscando minimizar el desgaste que la movilidad continua le generaba; para esto aprovecho la experiencia de algunos de algunos grupos que se habían especializado en el cultivo de algunas especies de tubérculos, vegetales y plantas, iniciando un proceso de sedentarización, pasando de un proceso de aprovechamiento circunstancial de la naturaleza a uno de producción tecnificada y precedida por la aparición de nuevas y mejores herramientas como de técnicas de cultivo que a su vez generaron la domesticación de las especies vegetales mediante su manejo genético. Estos aspectos generaron que otros grupos móviles se unieran formando sociedades organizadas, ocupando un mismo espacio geográfico y bajo unas mismas normas. “Estas sociedades, al ampliar la capacidad de producción, contaron con excedentes de alimentos que permitieron que un número cada vez mayor de personas abandonara las actividades de subsistencia. Surgió así la división del trabajo, provocando procesos de estratificación social y de organización política”. (Pinzón, 2010).

Se estima que la mayor afectación, por la mala gestión de los residuos sólidos, se inicia durante la Edad Media con la concentración de grandes y crecientes volúmenes de población en las ciudades que acrecienta los problemas de eliminación de los residuos sólidos que son vertidos a las calles, en predios sin edificar y en terrenos cercanos a las ciudades, debido a la carencia de una infraestructura mínima ambiental, generando una proliferación de vectores transmisores de enfermedades, “los esfuerzos de las autoridades se centraron más en curar la enfermedad, que en conocer y profundizar en las posibles causas que originaban la epidemia”. Con el tiempo surgen nuevas tendencias higienistas que traen la necesidad de realizar una organización espacial de las ciudades e implementar la construcción de algunas obras como redes de alcantarillado o a la disposición de los residuos en espacios alejados de las ciudades ya que por la distancia no generaban riesgos sanitarios.

Este tipo de disposición como vertedero a cielo abierto fue funcional hasta entrado el siglo XX, donde se fortalecen las ideas ambientalistas y los residuos sólidos se convierten en un problema social, no obstante se vio que transportar los residuos largas distancias resulta caro e incómodo y que, incluso en las zonas donde vive poca gente, surge una violenta oposición ciudadana a los vertidos, aunado a una serie de factores de contaminación entre los que se pueden contar, la gran variedad de residuos debido a los cambios en los componentes de materiales más livianos, baratos y en especial resistentes tanto al uso como a la capacidad de la naturaleza para reincorporarlos a esta, como a la falta de gestión de estos en la

fuelle; entre otros problemas se evidencia la generación de gases invernadero producto de la descomposición e incineración de los mismos, malos olores, la proliferación de vectores terrestres y aéreos, la generación de lixiviados producto de la descomposición de las basuras que se mezclan con las aguas de lluvia, vertiendo a las quebradas y ríos e infiltrándose en las capas inferiores del suelo, contaminando las aguas subterráneas. Hacia finales de los años 70, con la gestión de grupos ambientalistas y las condiciones antihigiénicas que presentaban los vertederos al aire libre, se desarrolla un método de ingeniería que consistió en la disposición ordenada de los residuos en celdas, dispuestos en pequeñas capas que son compactadas buscando reducir su volumen y cubiertas con mantos de tierra para prevenir los efectos negativos sobre el medio natural para de esta forma mitigar el impacto ambiental. (Pinzón, 2010).

### **5.2.3.2 Tipos de sistemas de disposición**

La disposición de los residuos sólidos se ha realizado de varias maneras, entre las que se pueden relacionar: la disposición de los residuos en la margen de un río o quebrada buscando que estos los trasladen fuera de la vista y límites de la población. Otra forma de disposición es la quema a cielo abierto de los residuos con lo que se busca una reducción en el volumen, la eliminación de fuentes de vectores y malos olores, al igual que el anterior es un sistema que genera contaminación visual pero su mayor impacto se da en la generación de GEI.

El sistema de incineración de residuos busca la reducción del tamaño de estos hasta en un 90% y en peso hasta un 75%, la incineración ha sido objeto de críticas desde el punto de vista medioambiental debido a la formación de sustancias muy tóxicas, dioxinas y furanos, que junto a diferentes metales pesados pueden ser emitidos por estas instalaciones. Desde el punto de los ambientalistas este sistema no es bien visto por su alto poder de contaminación. El compostaje es otra forma de disposición, aunque no muy utilizada, que consiste en utilizar los residuos sólidos urbanos, RSU's, orgánicos para aprovecharlos en el campo como abono, mediante mezcla y tratamiento de los mismos. El reciclaje técnico adoptado en el siglo XX utiliza los materiales reutilizables y los aprovechan nuevamente industrial y comercialmente. Los rellenos sanitarios son una obra de infraestructura que aplica métodos de ingeniería de características técnicas que permite enterrar de forma controlada los residuos, mediante técnicas de apisonamiento e intercalación con capas de tierra compactada de manera sucesiva. (Pinzón, 2010).

### **5.2.3.3 Tipos de vertedero**

Como lo define Tchobanoglous (1994), los vertederos son las instalaciones físicas utilizadas para la evacuación, en los suelos de la superficie de la tierra, de los rechazos procedentes de los residuos sólidos. El término "vertedero sanitario

controlado” se refiere a una instalación ingenieril para la evacuación de RSU, diseñada y explotada para minimizar los impactos ambientales y sobre la salud pública.

El termino celda se utiliza para describir el volumen de material depositado en un vertedero durante un periodo de explotación, normalmente un día. Una celda incluye: los residuos sólidos depositados y la materia de cubrimiento. El cubrimiento diario normalmente consiste en 15 o hasta 30 cm de suelo natural o materiales alternativos, como compost, que se aplican a los frentes de trabajo del vertedero al final de cada periodo de operación. Los objetivos del cubrimiento diario son: controlar el vuelo de materiales residuales, prevenir la entrada o salida del vertedero de vectores sanitarios, tales como ratas, moscas y otros, y controlar durante la operación la entrada de agua en el vertedero. (Tchobanoglous, 1994).

Los principales tipos de vertederos utilizados para la disposición final de los residuos sólidos se presentan a continuación:

- **Vertedero Incontrolado.** Se denomina así al vertedero en el que no se aplican medidas protectoras del impacto sobre el medio ambiente. Es el tradicional basurero, también llamado botadero a cielo abierto en algunos países latinoamericanos.
- **Vertedero Controlado o Relleno Sanitario Anaerobio.** En él básicamente los residuos son depositados, triturados, compactados y cubiertos con tierra diariamente en una zona acondicionada previamente para este fin. Se debe proceder a la depuración de las aguas filtradas (lixiviados) y a la recuperación de los gases generados en el interior del vertedero por la descomposición de los residuos (biogás). Dependiendo del grado de densidad que los residuos alcancen, se puede hablar de vertederos de alta densidad (0,9 - 1,0 t/m<sup>3</sup>), media densidad (0,7 - 0,8 t/m<sup>3</sup>) y baja densidad (0,5 - 0,6 t/m<sup>3</sup>).
- **Vertedero Controlado Aerobio.** Es similar al anterior, pero sin el recubrimiento diario de los residuos. Con ello, se logra una fermentación aerobia de los residuos. No se genera biogás.
- **Vertederos para residuos sólidos triturados.** Es un método alternativo de vertido que implica la trituración de los residuos sólidos antes de colocarlos en el vertedero. Los residuos triturados pueden colocarse en una densidad de hasta el 35 por 100 mayor que los residuos no triturados, y sin cubrimiento diario, en las normativas de algunos países. Como se pueden compactar los residuos triturados formando una superficie más apretada y uniforme, puede ser suficiente una pequeña cantidad de suelo y otro

material de cubrimiento para controlar la infiltración de agua durante la operación del relleno.

- **Otros tipos de vertederos.** Además de los métodos convencionales de vertidos ya descritos, se están desarrollando otros métodos de vertido especializados, diseñados para mejorar los distintos objetivos de gestión de vertederos. Los métodos de explotación alternativos que están utilizándose actualmente incluyen: 1) vertederos diseñados para maximizar la producción de gas dentro del vertedero, y 2) vertederos funcionando como unidades para el tratamiento integral de residuos sólidos.

#### 5.2.4 Gases de Vertedero

El gas de vertedero está compuesto de varios gases que están presentes en grandes cantidades (gases principales) y de varios gases que están presentes en pequeñas cantidades (oligogases). Los gases principales de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos. Algunos de los oligogases, aunque presentes en pequeñas cantidades, pueden ser tóxicos y podría presentar riesgo para la salud pública. (Tchobanoglous, 1994).

Los gases que se encuentran en los vertederos incluyen amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), hidrogeno ( $\text{H}_2$ ), sulfuro de hidrogeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), nitrógeno ( $\text{N}_2$ ) y oxígeno ( $\text{O}_2$ ). En la Tabla 2 se presenta el porcentaje típico de los gases que se encuentran en un vertedero de residuos sólidos urbanos.

**Tabla 2** Composición típica encontrada en el gas de vertedero de residuos sólidos urbanos

Compuesto	Porcentaje
Metano	45-60
Dióxido de Carbono	40-60
Nitrógeno	2-5
Oxígeno	0,1- 1
Sulfuros, disulfuros, mercaptanos, etc.	0-1
Amoníaco	0,1- 1
Hidrogeno	0-0,2
Monóxido de Carbono	0-0,2
Constituyentes en cantidades traza	0,01- 0,6

Fuente: Tchobanoglous, 1994

#### **5.2.4.1 Factores de formación de los GEI**

Los gases generados por los vertederos a cielo abierto o por rellenos sanitarios vienen siendo considerados como una importante fuente de GEI debido a su composición y al contenido de estos. Una constante del proceso de fermentación y descomposición de las basuras en los vertederos es la formación de gases y está en función de una serie de factores sobre los que se puede actuar para mejorar las reacciones de fermentación, pero no sobre la mayoría. Entre los factores a considerar se encuentran:

- La antigüedad de los residuos donde la mayor producción de gases se genera a los pocos meses de la disposición del residuo.
- La humedad donde dependiendo de las características del clima donde en lugares secos el proceso de fermentación se reduce e incluso el residuo se llega a modificar.
- La forma física del residuo, donde el proceso de fermentación se puede incrementar se esté esta triturado.
- Presencia de sustancia inhibidoras de la descomposición de los residuos como los metales pesados y sulfitos.
- La temperatura que varía en gamas mesofílicas, de 30 38 °C y las termofílicas entre 55 y 60 °C.

La compactación de los residuos que aunadas a climas secos reducen el grado de fermentación de los residuos. Las emisiones de metano a nivel mundial asociadas al vertido de residuos han sido estimadas por la EPA entre 22 y 46 millones de toneladas por año, con una media de 34 millones de toneladas por año, (Christensen, R. et al., 1996). Para las emisiones de metano CH<sub>4</sub> generado por los rellenos sanitarios el IPCC cuantifica estas a partir de tres variables:

- La cantidad de residuos dispuestos en el relleno sanitario
- La fracción de carbono orgánico degradable DOC.
- La fracción de DOC que se convierte en metano CH<sub>4</sub>.

#### **5.2.4.2 Fases generales en la generación de gases de vertedero.**

La generación de los principales gases de vertedero se produce en cinco o menos fases secuenciales. A continuación, se describen cada una de ellas.

#### **5.2.4.2.1 Fase I. Ajuste inicial**

Es la fase en la que los componentes orgánicos biodegradables de los residuos sólidos urbanos sufren descomposición microbiana mientras se colocan en un vertedero y poco después. En la fase I, se produce descomposición biológica bajo condiciones aerobias, porque hay cierta cantidad de aire atrapado dentro del vertedero. La fuente principal de organismos, ambos, aerobios y anaerobios, responsables de la descomposición de los residuos es el material del suelo que se utiliza como cubrimiento diario y final.

#### **5.2.4.2.2 Fase II. Fase de transición**

En esta fase desciende el oxígeno y comienzan a desarrollarse condiciones anaerobias. Mientras el vertedero se convierte en anaerobio, el nitrato y el sulfato, que pueden servir como receptores de electrones en reacciones de conversión biológica, a menudo se reducen a gas nitrógeno y sulfuro de hidrógeno. El comienzo de las condiciones anaerobias se puede supervisar midiendo el potencial de oxidación/reducción que tiene el residuo.

#### **5.2.4.2.3 Fase III. Fase ácida**

En esta fase se acelera la actividad microbiana iniciada en la fase II con la producción de cantidades significativas de ácidos orgánicos y pequeñas cantidades de gas de hidrógeno. El primer paso en el proceso de tres pasos implica la transformación, mediada por enzimas (hidrólisis), de compuestos con alto peso molecular en compuestos aptos para ser utilizados por los microorganismos como fuentes de energía y de carbono celular. El segundo paso en el proceso (acidogénesis) implica la conversión microbiana de los compuestos resultantes del primer paso en compuestos intermedios de bajo peso molecular. Los microorganismos implicados en esta conversión, llamados no metanogénicos, son las bacterias anaerobias facultativas y obligadas.

#### **5.2.4.2.4 Fase IV. Fase de fermentación del metano**

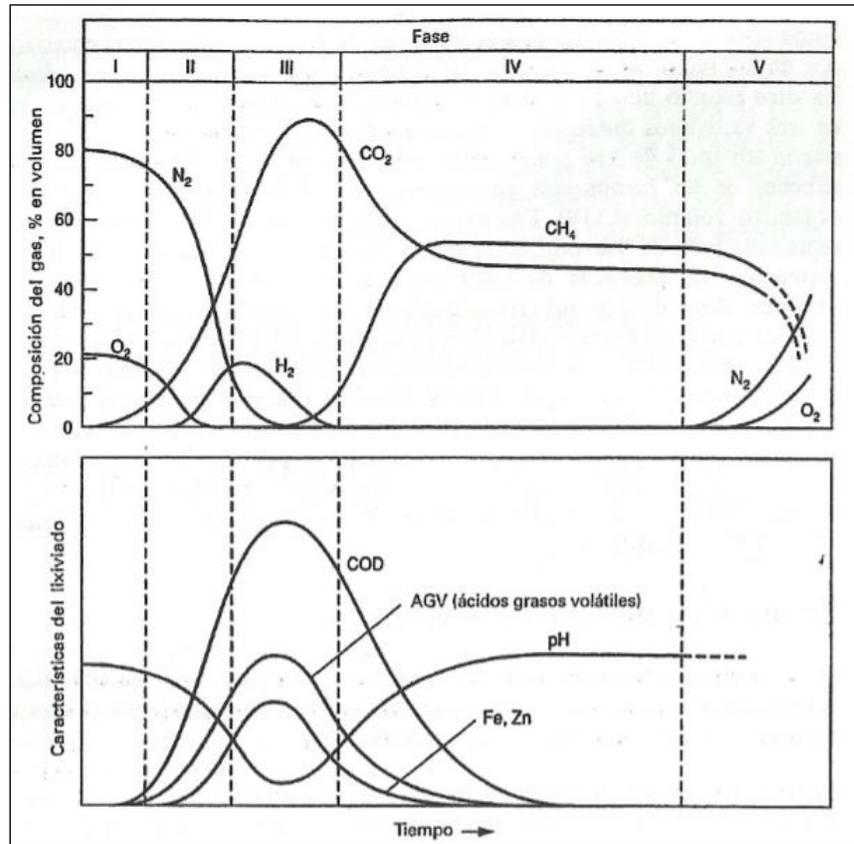
En esta fase, un segundo grupo de microorganismos, que convierten el ácido acético y el gas de hidrógeno producidos por los formadores de ácidos en la fase ácida en  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$  llegan a ser más predominantes. En algunos casos, estos organismos comenzarán a desarrollarse hacia el final de la fase III. Los microorganismos responsables de esta conversión son estrictamente anaerobios y se llaman metanogénicos. En la fase IV la formación de metano y ácido se produce simultáneamente, aunque la velocidad de formación de ácidos es considerablemente más reducida.

### 5.2.4.2.5 Fase V. Fase de maduración

En esta fase se produce después de convertirse el material inorgánico biodegradable en  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$  durante la fase IV. Mientras la humedad sigue migrando a través de los residuos, se convierten porciones del material biodegradable que anteriormente no estaban disponibles. Durante la fase V la velocidad de generación del gas de vertedero disminuye significativamente, porque la mayoría de los nutrientes disponibles se han separado con el lixiviado durante las fases anteriores, y los sustratos que quedan en el vertedero son de una degradación lenta.

En la Figura 2 se presentan las fases en la generación de gases de vertedero. (I-ajuste inicial, II-fase de transición, III-fase ácida, IV-fermentación del metano y V-fase de maduración).

Figura 2 Fases generales en la generación de gases de vertedero



Fuente: Tchobanoglous, 1994.

### **5.3 MARCO LEGAL**

A continuación, se presentan las leyes, decretos y normas nacionales e internacionales vigentes que articulan y dictaminan los aspectos referentes al Análisis de Ciclo de Vida y el Manejo y disposición final de los residuos sólidos.

Decreto 2811 de 1974, por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.

Norma Mexicana NMX-AA-61-1985. Protección al ambiente-Contaminación del suelo-Residuos sólidos municipales –Determinación de la generación. Establece e método de cuarteo para residuos sólidos municipales y la obtención de especímenes para los análisis en el laboratorio.

Decreto 605 de 1996 por el cual se reglamenta la ley 142 de 1994 en relación con la prestación del servicio público domiciliario de aseo. Se estipulan las normas sobre características y calidad del servicio de aseo, sistemas de aprovechamiento y disposición final, así como las entidades prestadoras del servicio público domiciliario de aseo.

Decreto 0838 de 2005, por el cual se modifica el Decreto 1713 de 2002 sobre disposición final de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones. Estipula la localización de áreas para la disposición final de residuos sólidos (procedimiento, criterios, metodología, prohibiciones y restricciones), consideraciones ambientales y técnicas de planeación, construcción y operación de rellenos sanitarios y los sistemas regionales de disposición final de residuos sólidos.

Norma Técnica Colombiana NTC ISO-14040 (2007). Análisis de ciclo de vida (ACV). Detalla los requisitos para llevar a cabo un ACV.

Resolución 908 de 2008, por la cual se establecen las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmosfera por fuentes fijas. Define los estándares de emisión admisibles de contaminantes al aire para fuentes fijas puntuales de actividades industriales, para equipos de combustión externa, para instalaciones donde se realice tratamiento térmico a residuos y/o desechos peligrosos, para instalaciones donde se realice tratamiento térmico a residuos no peligrosos. Además, establece la metodología para la medición de emisiones para fuentes fijas y el sistema de control de emisiones.

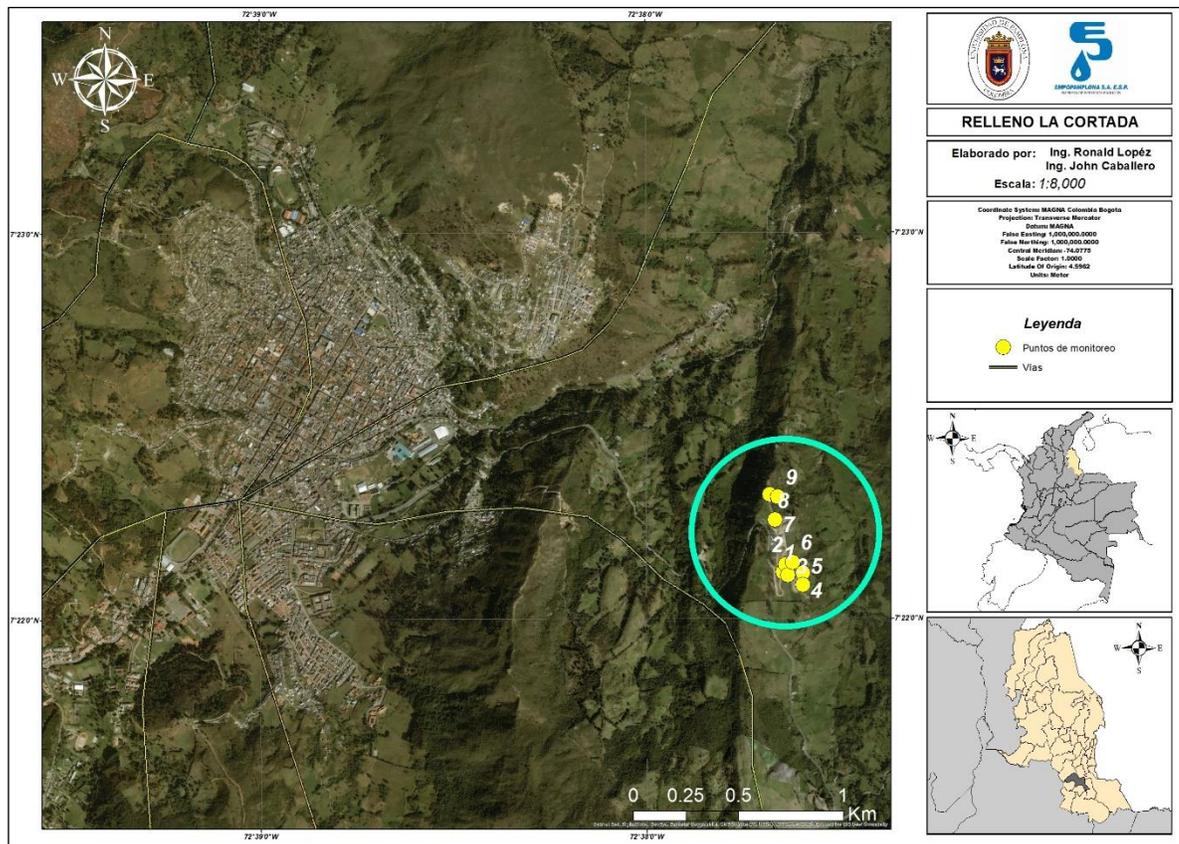
Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico. RAS versión 2012. Título F: Sistemas de Aseo Urbano. Se fijan los criterios básicos y requisitos mínimos que deben reunir los diferentes procesos involucrados en la conceptualización, el diseño, la construcción, la supervisión técnica, la puesta en marcha, la operación y el mantenimiento de los sistemas de aseo urbano, con el fin de garantizar su seguridad, durabilidad, funcionalidad, calidad, eficiencia, sostenibilidad y redundancia dentro de un nivel de complejidad determinado.

## 5.4 MARCO CONTEXTUAL

El relleno sanitario se encuentra ubicado en el municipio de Pamplona, vereda de Chichira, al costado nor-oriental de la vía Pamplona – Chitagá a la altura del kilómetro 4. Sus coordenadas según el cuadrángulo H13 del instituto de Investigaciones Geológico-mineras de Colombia las siguientes: Norte entre 1'307.000 y 1'308.000, y Este entre 1'159.000 y 1'160.000. (Ver Figura 3).

**Figura 3** Localización general del relleno sanitario regional La Cortada

**Fuente:** López T, 2018.



La disposición final de los residuos generados por el municipio de Pamplona y su provincia está encargada por la empresa de servicios públicos “Empopamplona”, la cual se encarga de todas las actividades para la operación y manejo técnico del relleno Sanitario Regional “La Cortada”. Las actividades más importantes realizadas para la disposición final de los residuos se presentan a continuación:

- Adecuación de la Celda

La adecuación de las celdas comprende las actividades correspondientes a Profundidad de la celda, inclinación, ubicación de filtros y chimeneas, entre otros puntos vitales en el manejo de los residuos sólidos. (Empopamplona, 2012).

- Recepción de los Residuos Sólidos

Inicia con el ingreso del vehículo recolector a las instalaciones físicas del relleno sanitario regional donde el personal de entrada diligencia un formato y el Supervisor indica la posición y ubicación del descargue de los residuos sólidos, posteriormente el vehículo recolector se dirige a la salida del relleno y hace una parada junto a la caseta, donde la persona encargada registra la información en los formatos con la firma respectiva del conductor del vehículo recolector concluyendo la actividad. (Empopamplona, 2012).

- Traslado y Compactación de los residuos sólidos

Después de ser depositado los residuos en el patio o zona estable para el descargue, el Buldócer procede al traslado o arrastre de estos residuos a la celda que en ese momento se encuentre en funcionamiento, posterior a esta actividad el buldócer acomoda estos residuos de tal forma que cumpla con las especificaciones del diseño generando con la maquina una compactación uniforme a los residuos dispuestos, aumentando la capacidad y la estabilidad de la celda. (Empopamplona, 2012).

- Cubrimiento de los residuos sólidos

Al terminar el trabajo diario o llenado de la celda se procede a dar una cobertura temporal del frente de la celda con materiales como lo son una capa de geotextil, capa de plástico o en su defecto material de escombros como última opción, esto con el fin de minimizar el impacto visual, propagación de vectores y proliferación de olores ofensivos, además de aislar el contacto de aguas lluvias con el fin de evitar el aumento de lixiviados. (Empopamplona, 2012).

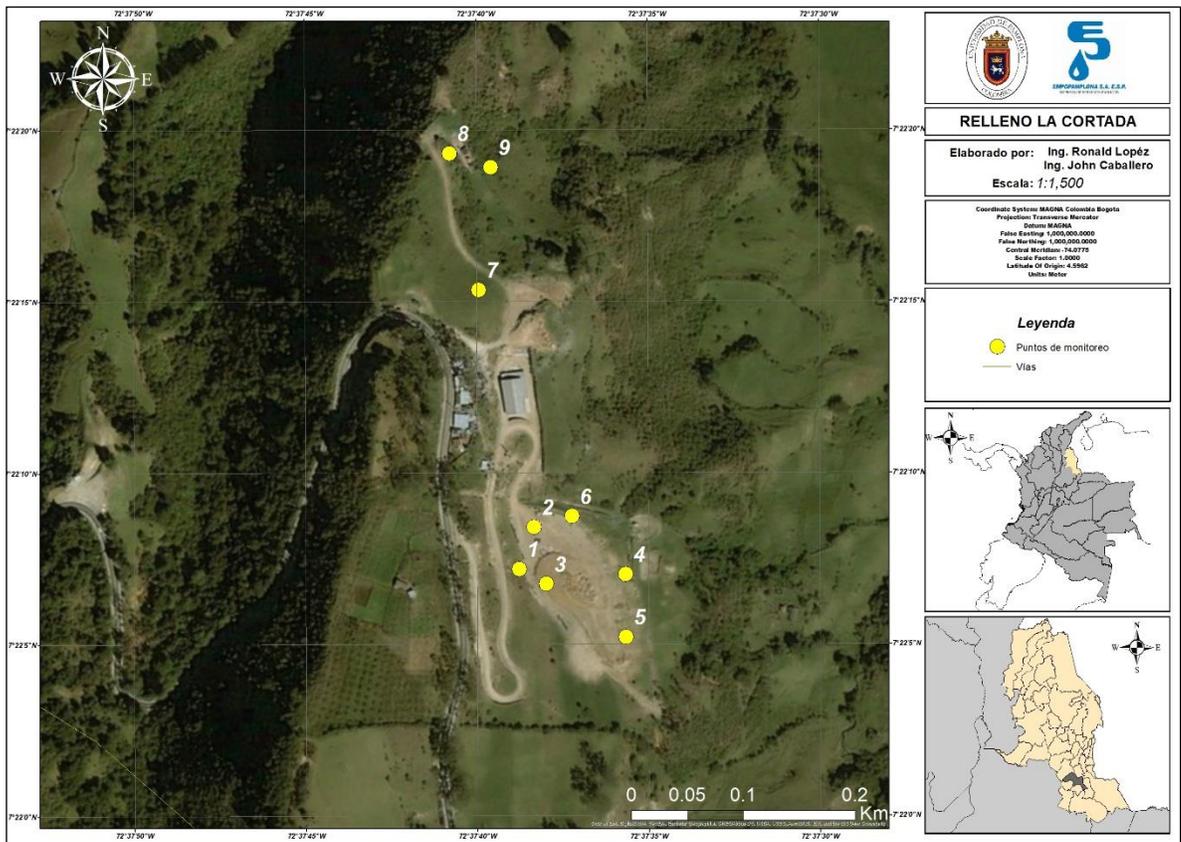
- Manejo de Lixiviados

Los líquidos lixiviados, producto de la descomposición de los Residuos Sólidos Urbanos, son drenados a través de los filtros a un tanque de recepción, que almacena temporalmente los mismos, en el mismo tanque se le realiza un pre tratamiento y sedimentación de lodos y posteriormente se realiza recirculación de los mismos, mediante un sistema modular de riego (por aspersión) sobre las celdas clausuradas, para reducir la cantidad o volumen de los líquidos. Tareas de Cierre de la Celda: Para la clausura de celdas, se le agregará una capa final de 40

cm. de espesor de material de cobertura y se compactará, se agrega una capa de arcilla compactada para lograr su impermeabilización. Posteriormente se siembra vegetación para proteger la superficie. (Empopamplona, 2012).

En la Figura 4 se muestra una localización más detallada del relleno sanitario regional La Cortada y, a su vez, los puntos de monitoreo seleccionados para la medición de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ).

**Figura 4** Relleno sanitario regional La Cortada y puntos de muestro de  $\text{CO}_2$



Fuente: López T, 2018

## 6. CAPITULO II. CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS

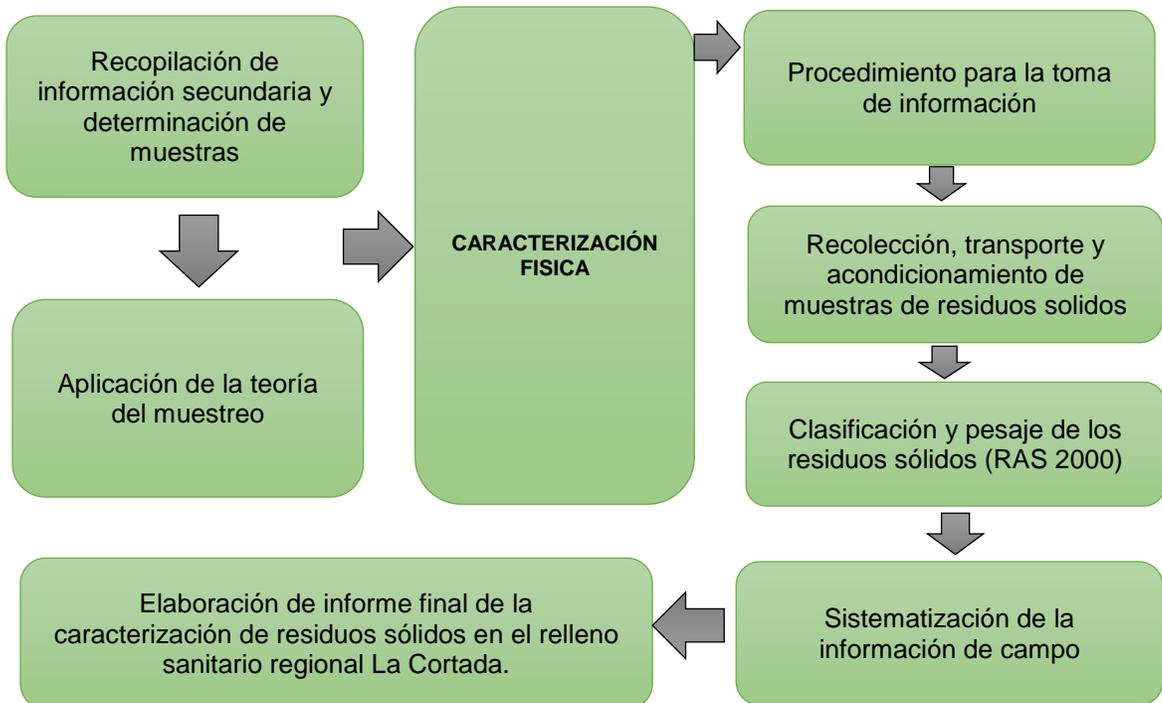
### 6.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS

Como parte de las actividades investigativas necesarias para la toma de datos en el análisis del ciclo de vida del relleno sanitario, se hizo necesario realizar la caracterización física de los residuos con el ánimo de determinar la composición porcentual en el municipio de Pamplona y también en los municipios de la provincia, que disponen sus residuos en el relleno sanitario: Pamplonita, Mutiscua, Cacota, Silos y Chitagá. A continuación, se detalla la metodología a seguir para la determinación de tamaño de muestras y procedimientos de caracterización para llegar a los resultados que se presentan en cada municipio. En el Anexo A se presentan las evidencias fotográficas de la caracterización realizada de los residuos.

#### 6.1.1 Metodología

La caracterización física de los Residuos Sólidos dispuestos en el relleno regional “La Cortada” comprende las etapas descritas en la Figura 5.

**Figura 5** Metodología general para la caracterización de residuos sólidos



**Fuente:** López T, 2018.

### 6.1.1.1 Toma de información secundaria y determinación de muestras

Definición de población, son todas las viviendas particulares y establecimientos comerciales del distrito bajo estudio, posteriormente se procede a la división de la población en estratos, esto se hace estableciendo las siguientes categorías:

- Zona Comercial (Estrato Comercial).
- Zona Residencial (Estrato 1), viviendas de ingreso bajo.
- Zona Residencial (Estrato 2), viviendas de ingreso medio.
- Zona Residencial (Estrato 3), viviendas de ingreso alto.

Ubicación de los estratos socioeconómicos en el plano de la ciudad donde se registren todas y cada una de las unidades de muestra para que puedan ser seleccionados.

Utilización de la generación per cápita, como se considera que la población está conformada por N viviendas, las mismas que tienen Ri habitantes y producen Wi kg de basura en un día. Así se tiene que cada una produce  $X_i = W_i / R_i$  kg/hab/d.

### 6.1.1.2 Aplicación de la Teoría del Muestreo

Entre los diversos métodos de muestreo, el más común es el muestreo estratificado proporcional. En este método se asegura que cada vivienda de un estrato tiene la misma probabilidad de ser seleccionada. (Ecuación 1).

$$n = \frac{Z^2_{1-\alpha/2} N \sigma^2}{(N-1)E^2 + Z^2_{1-\alpha/2} \sigma^2} \quad \text{Ec (1)}$$

Dónde:

- n: Tamaño de la muestra (viviendas).
- N: Cantidad total de viviendas.
- $Z_{\alpha/2}$ : 1.96: Coeficiente de confianza, se considera este valor para obtener un nivel de confianza  $(1-\alpha)$  del 95% en la generación estimada de residuos sólidos.
- $\sigma$ : 0.15 gramos PPC: Desviación estándar, es decir en cuanto se espera que varíe la generación per cápita de residuos sólidos domiciliarios respecto al promedio de que se obtendrá.
- E: 0.0755 Kg/hab/día: Es el error permisible en la estimación de la GPC, se asume que es el 10% del valor promedio esperado.

En las Tablas 3, 4, 5, 6, 7 y 8 se presenta la determinación de la muestra estadística para los municipios de Pamplona y su provincia.

**Tabla 3** Determinación de la muestra estadística municipio de Pamplona.

<b>TIPO RECOLECCION</b>	<b>USUARIO</b>	<b>N° Usuarios</b>	<b>Muestra Estadística</b>	<b>Porcentaje De Muestra (%)</b>
<b>RESIDENCIALES</b>				
<b>ESTRATOS</b>				
1		2371	66	17,7
2		4344	122	32,7
3		4427	123	32,8
4		1463	39	10,5
5		0	0	0
6		0	0	0
Total		12605	350	93,7
<b>PEQUEÑOS PRODUCTORES</b>				
Comercial		668	17	4,56
Oficial		81	1	0,3
Industrial		58	1	0,2
Total		807	19	5.06
<b>GRANDES PRODUCTORES</b>				
Comercial		17	2	0,54
Especial		31	1	0,2
Oficial		40	1	0,3
Industrial		7	1	0,2
Total		95	4	1.24
Total Usuarios Recolección		13507	373	100

**Fuente:** López y Rivera, 2018

**Tabla 4** Determinación de la muestra estadística municipio de Cécota

<b>TIPO USUARIO RECOLECCION</b>	<b>TAMAÑO</b>	<b>TOTAL %</b>	<b>MUESTRA</b>
ESTRATO 1	169	54,17%	41
ESTRATO 2	133	42,63%	33
ESTRATO 3	0	0,00%	0
ESTRATO 4	0	0,00%	0
ESTRATO 5	0	0,00%	0
COMERCIAL	0	0,00%	0
OFICIAL	10	3,21%	2
INSTITUCIONAL	0	0,00%	0
<b>TOTAL</b>	<b>312</b>	<b>1</b>	<b>77</b>

**Fuente:** López y Rivera, 2018

**Tabla 5** Determinación de la muestra estadística municipio de Chitagá

<b>TIPO USUARIO RECOLECCION</b>	<b>TAMAÑO</b>	<b>TOTAL %</b>	<b>MUESTRA</b>
ESTRATO 1	0	0,00%	0
ESTRATO 2	883	100,00%	91
ESTRATO 3	0	0,00%	0
ESTRATO 4	0	0,00%	0
ESTRATO 5	0	0,00%	0
COMERCIAL	0	0,00%	0
OFICIAL	0	0,00%	0
INSTITUCIONAL	0	0,00%	0
<b>TOTAL</b>	<b>883</b>	<b>1</b>	<b>91</b>

**Fuente:** López y Rivera, 2018

**Tabla 6** Determinación de la muestra estadística municipio de Mutiscua

<b>TIPO USUARIO RECOLECCION</b>	<b>TAMAÑO</b>	<b>TOTAL %</b>	<b>MUESTRA</b>
ESTRATO 1	24	16,00%	10
ESTRATO 2	123	82,00%	50
ESTRATO 3	0	0,00%	0
ESTRATO 4	0	0,00%	0
ESTRATO 5	0	0,00%	0
COMERCIAL	0	0,00%	0
OFICIAL	3	2,00%	1
INSTITUCIONAL	0	0,00%	0
<b>TOTAL</b>	<b>150</b>	<b>1</b>	<b>61</b>

**Fuente:** López y Rivera, 2018

**Tabla 7** Determinación de la muestra estadística municipio de Silos

<b>TIPO USUARIO RECOLECCION</b>	<b>TAMAÑO</b>	<b>TOTAL %</b>	<b>MUESTRA</b>
ESTRATO 1	83	25,70%	20
ESTRATO 2	230	71,21%	55
ESTRATO 3	0	0,00%	0
ESTRATO 4	0	0,00%	0
ESTRATO 5	0	0,00%	0
COMERCIAL	0	0,00%	0
OFICIAL	10	3,10%	2
INSTITUCIONAL	0	0,00%	0
<b>TOTAL</b>	<b>323</b>	<b>1</b>	<b>77</b>

**Fuente:** López y Rivera, 2018

**Tabla 8** Determinación de la muestra estadística municipio de Pamplonita

<b>TIPO USUARIO RECOLECCION</b>	<b>TAMAÑO</b>	<b>TOTAL %</b>	<b>MUESTRA</b>
ESTRATO 1	258	50,69%	43
ESTRATO 2	226	44,40%	38
ESTRATO 3	15	2,95%	2
ESTRATO 4	0	0,00%	0
ESTRATO 5	0	0,00%	0
COMERCIAL	0	0,00%	0
OFICIAL	10	1,96%	2
INSTITUCIONAL	0	0,00%	0
<b>TOTAL</b>	<b>509</b>	<b>1</b>	<b>84</b>

**Fuente:** López y Rivera, 2018

### **6.1.1.3 Etapas de la caracterización:**

#### **6.1.1.3.1 Procedimiento para la toma de información**

Una vez definido el tamaño de muestra (número de viviendas a muestrear), se lleva a cabo el siguiente procedimiento:

- Seleccionar de manera aleatoria las viviendas a muestrear, con ayuda del plano catastral de la localidad, realizando la respectiva visita a la vivienda o local comercial, en el cuál se argumenta el proyecto a desarrollar y se

diligencia el consentimiento informado, que certifica su compromiso con la entrega de la muestra.

- Definir de manera coordinada con los funcionarios municipales, el lugar donde se llevará a cabo el trabajo de caracterización.

#### **6.1.1.3.2 Recolección, transporte y acondicionamiento de muestras de Residuos Sólidos**

El personal encargado de replicar la información por los diferentes usuarios seleccionados, recoge las bolsas con residuos los días programados, estos residuos serán transportados, en vehículos dispuestos por Empopamplona o la universidad de pamploña, que los llevarán a los lugares dispuestos para realizar la caracterización.

#### **6.1.1.3.3 Clasificación y Pesaje de los residuos sólidos de acuerdo a la normatividad RAS 2000**

Para determinar la composición física de los residuos sólidos, Se debe colocar los residuos sobre un plástico grande, con la finalidad de no combinar los residuos con tierra, Se rompen las bolsas y se vierte el desecho formando un montón, se procede a realizar una mezcla, con la finalidad de homogenizar la muestra, todo ello con el fin de dividir el montón en cuatro partes (método de cuarteo) y se eligen dos partes opuestas, que forman un nuevo montón más pequeño. La muestra menor se vuelve a mezclar y se divide en cuatro partes nuevamente, luego se escogen dos opuestas y se forma otra muestra más pequeña. Esta operación se repite hasta obtener una muestra consistente de aproximadamente 100 kilogramos.

Se separan los componentes del último montón y se clasifican, según especifica el RAS 2000, en su título F, en la sección F.1.4.4 Composición de los residuos sólidos, en el cuál se indica que, Los residuos sólidos deben clasificarse, al menos, de acuerdo con el siguiente esquema:

1. Residuos de comida y jardín
2. Productos de papel
3. Productos de cartón
4. Plástico
5. Caucho y cuero
6. Textiles
7. Madera
8. Productos metálicos
9. Vidrio
10. Productos cerámicos, ceniza, rocas y escombros

- 11. Huesos
- 12. Otros

Los componentes se van clasificando en recipientes pequeños, con ayuda de una balanza, se deben pesar los recipientes pequeños vacíos antes de empezar la clasificación. Una vez concluida la clasificación, se pesan los recipientes con los diferentes componentes y por diferencia se saca el peso de cada componente. Se calcula el porcentaje de cada componente teniendo en cuenta los datos del peso total de los residuos recolectados en un día ( $W_T$ ) y el peso de cada componente ( $P_i$ ), por medio de la ecuación 2:

$$\text{Porcentaje (\%)} = \frac{P_i}{W_T} * 100 \quad \text{Ec}$$

(2)

#### **6.1.1.3.4 Sistematización de la información de campo**

Con ayuda del formato de caracterización de R.S. (Anexo B), se tabula y ordena la información de acuerdo al RAS 2000 y/o querido por el proyecto, como es la división de los plásticos en las 7 líneas, separar los residuos de comida y de jardín y residuos de comida dividido en verduras, frutas y otros. Que posteriormente serán usados en la elaboración de resultados.

#### **6.1.1.3.5 Elaboración de informe final del estudio de caracterización de Residuos Sólidos en el relleno regional "la Cortada"**

Una vez se obtienen los datos necesarios en el formato de caracterización, se procede a recopilar los datos en archivos de Word para obtener las gráficas que representan, los porcentajes en los que se encuentran distribuidos, los residuos que se generan en los diversos municipios en estudio, obteniendo el insumo necesario para aplicar el análisis del ciclo de vida del estudio requerido.

### **6.1.2 Resultados de la Caracterización**

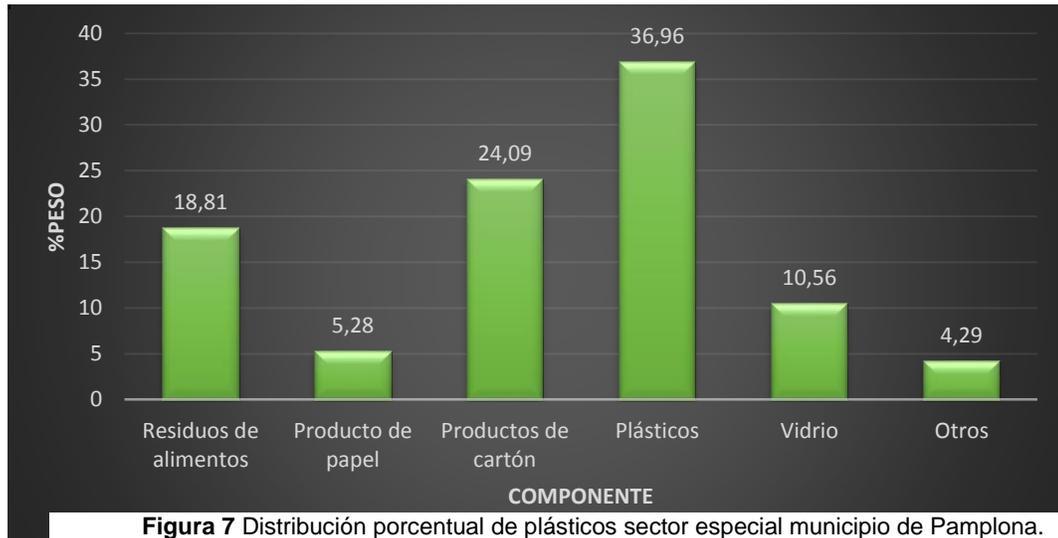
#### **6.1.2.1 Pamplona**

En el municipio de pamplona se realizó la caracterización de residuos sólidos en los sectores, Especial, comercial, Ruta 1 y Ruta 2.

### 6.1.2.1.1 Sector Especial

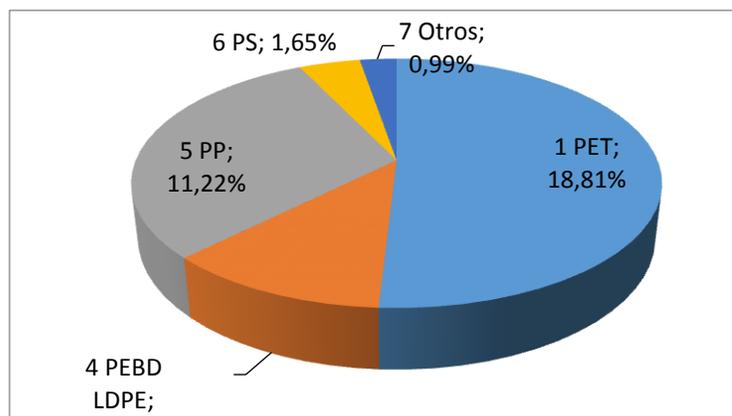
En la Figura 6 se evidencia una idea general de la generación de residuos en el sector especial del municipio de Pamplona.

**Figura 6** Composición Porcentual de la muestra sector especial municipio de Pamplona.



**Figura 7** Distribución porcentual de plásticos sector especial municipio de Pamplona.

evaluados, 6 obtuvieron datos representativos, entre los que se tiene al plástico (36.96%) y productos de cartón (24.09%) como los componentes de mayor presencia, seguidos de residuos de alimentos, vidrios, papel y otros, esto corresponde con las actividades que se desarrollan en el sector y demandas de estas materias en su mayor proporción, el plástico, a su vez fue separado en los 7 tipos de plásticos que se estandarizan en Colombia y nivel internacional. (Figura 7).



**Fuente:** López y Rivera, 2018

En la categoría de plásticos dentro del sector especial del municipio de Pamplona, la mayor demanda se establece en el PET (18.81%) y PP (11.22%), son los

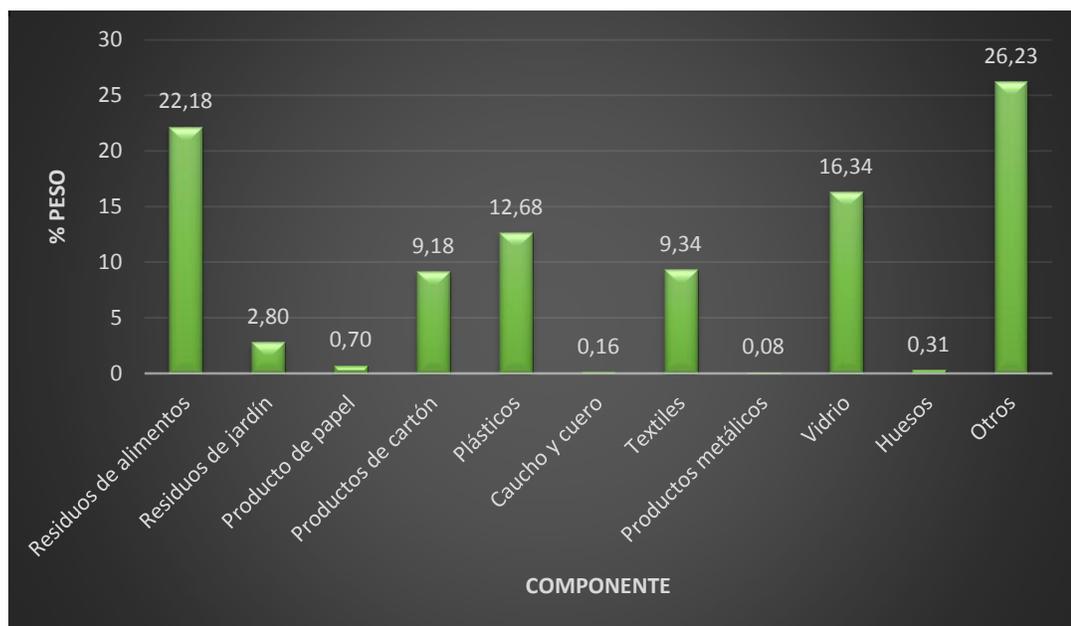
plásticos de mayor uso en Colombia, debido a su presencia en productos alimenticios como envoltura o envase, además el porcentaje de plástico en el residuo sólido de más uso en estos sectores del municipio.

#### 6.1.2.1.2 Sector Oficial

El sector oficial de Pamplona presenta una composición de residuos sólidos que nos da una idea de los productos usados y su impacto en la composición global del municipio y el relleno sanitario (Figura 8).

Al realizar la caracterización del sector oficial de los 12 componentes evaluados, solo uno no registró datos, que fueron los Productos cerámicos, ceniza, rocas y escombros, dentro de los de mayor porcentaje representativo tenemos los otros (26.23%), residuos de alimentos (22.18%) y seguido por el vidrio con un 16.34% dentro de la categoría de otros recaen los productos que no pertenecen a las demás categorías, elementos electrónicos o conocidos e-waste, seguido de los residuos de alimentos, por ser instituciones y representar afluencia de personal. La representación porcentual del plástico en este sector se presenta en la Figura 9.

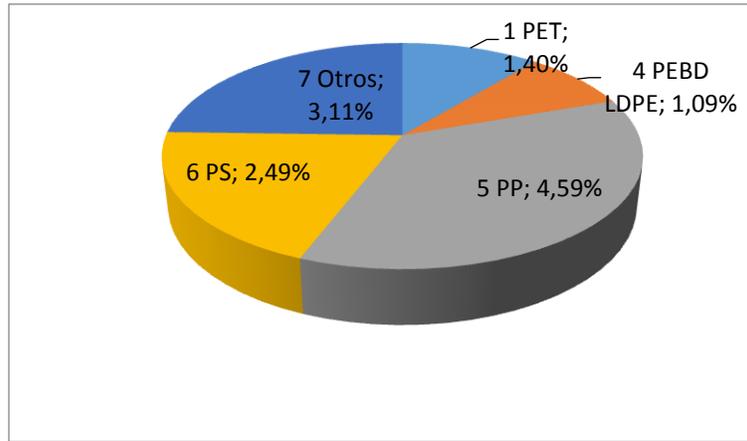
**Figura 8** Composición Porcentual de la muestra sector oficial municipio de Pamplona.



**Fuente:** López y Rivera, 2018

En el sector oficial del municipio de Pamplona, los porcentajes de plástico representaron el 12.68% dentro de los cuales los de mayor aporte son los PP (4,59%) y otros (3,11%), el uso de productos de envoltura de alimentos y otros como artículos médicos o juguetes.

**Figura 9** Distribución porcentual de plásticos sector oficial municipio de Pamplona.

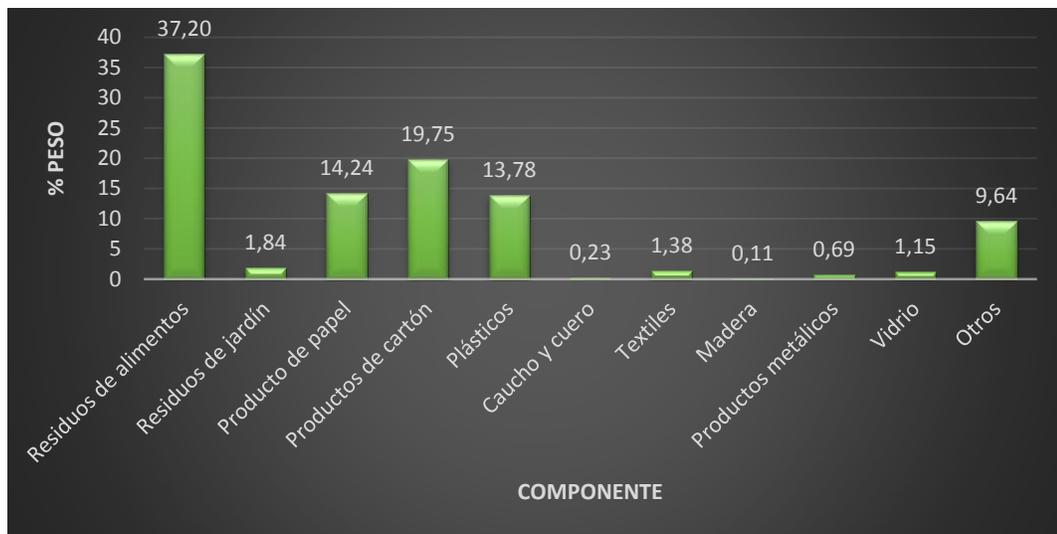


**Fuente:** López y Rivera, 2018

### 6.1.2.1.3 Sector Comercial

Un sector importante en el municipio de Pamplona es el sector comercial, debido a la generación de empleo y su gran presencia. En la Figura 10, se evidencia la distribución porcentual de los componentes evaluados en esta caracterización.

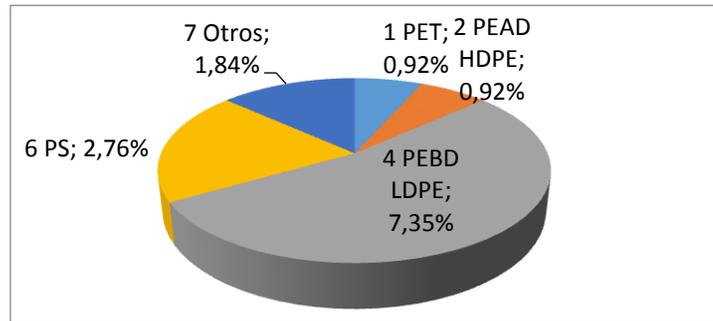
**Figura 10** Composición Porcentual de la muestra sector comercial municipio de Pamplona.



**Fuente:** López y Rivera, 2018  
Con el 37,20% de porcentaje

en peso, los residuos de alimentos son los de mayor generación en el sector comercial, dentro de los que se incluyen productos orgánicos, derivados de los restaurantes y microempresas de alimentos que componen este sector, seguido de los productos de cartón y papel que son usados para envolver, transportar y entregar dichos alimentos, los plásticos también aportan un porcentaje considerable y su clasificación se presenta en la Figura 11.

**Figura 11** Distribución porcentual de plásticos sector comercio municipio de Pamplona.



**Fuente:** López y Rivera, 2018

El plástico representó el 13.78% de los residuos generados en el sector comercial, siendo los de mayor uso, los PEBD con 7.35% y los PS con 2.76% estos resultados se pueden derivar de su alta presencia en productos cotidianos como aislante, componentes electrónicos, embalados.

#### 6.1.2.1.4 Pamplona, Ruta 1

Al realizar el recorrido con el camión compactador del aseo y recorrer algunos barrios del municipio, se determinó como ruta 1 a la caracterización que se hicieron en varios de estrato 1 y 2 cuyos componentes se encuentran en la Figura 12.

**Figura 12** Composición Porcentual de la muestra Ruta 1 municipio de Pamplona..

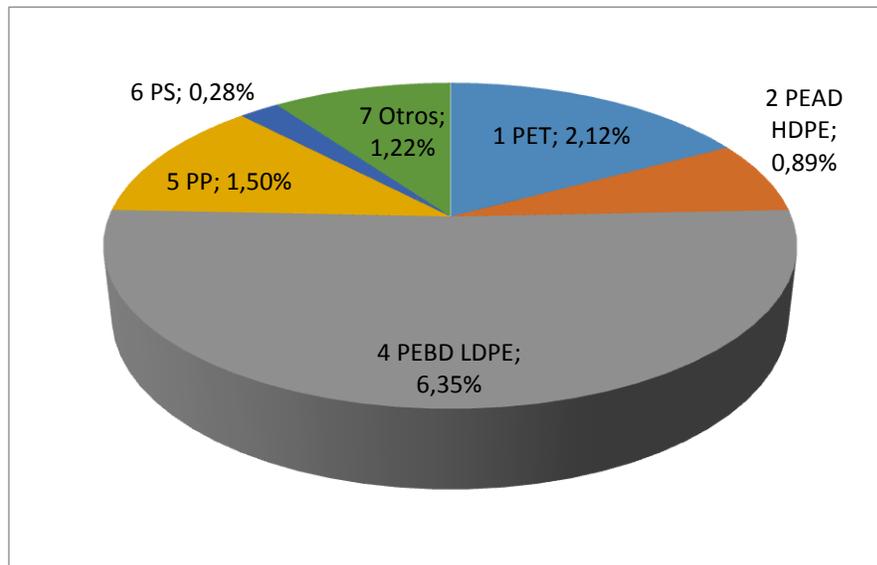


**Fuente:** López y Rivera, 2018

Una vez desarrollada la caracterización, los resultados de pesaje arrojaron que con un 62.25% los residuos de alimentos, son los desechos de mayor generación en esta ruta y estratos de Pamplona, debido a que muchas familias de estos sectores, se dedican a alimentar estudiantes de la universidad, junto a la falta de instrumentos que permitan un uso más adecuado de los residuos, como abono, seguidos a ello de forma lejana tenemos los plásticos con un 12.36 % que su

composición se encuentra en la Figura 13 y en menor valor tenemos la madera con 0.22%.

**Figura 13** Distribución porcentual de plásticos sector ruta 1 municipio de Pamplona.



**Fuente:** López y Rivera, 2018

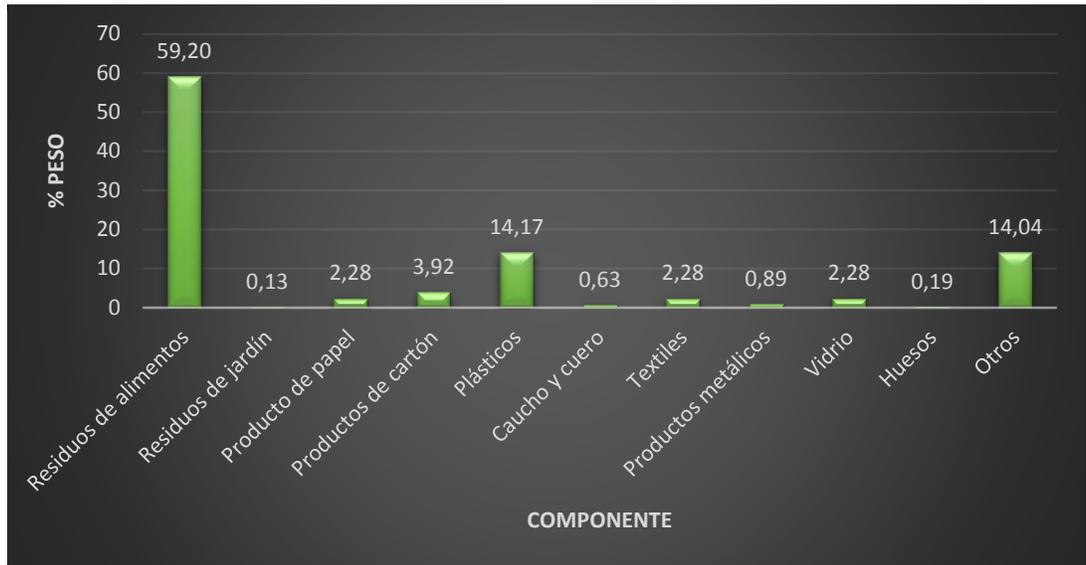
Dentro de la composición de los plásticos en la ruta 1, se evidencio que el plástico de mayor presencia en los estratos bajos del municipio es el 4. PEBD con un 6.35% seguido del PET con un 2.12% y el PP con un 1.50%.

#### **6.1.2.1.5 Pamplona, Ruta 2.**

En la Figura 14 se representa el porcentaje obtenido de la caracterización realizada en estratos 2 y 3 del municipio, los cuales fueron recogidos en la denominada ruta 2.

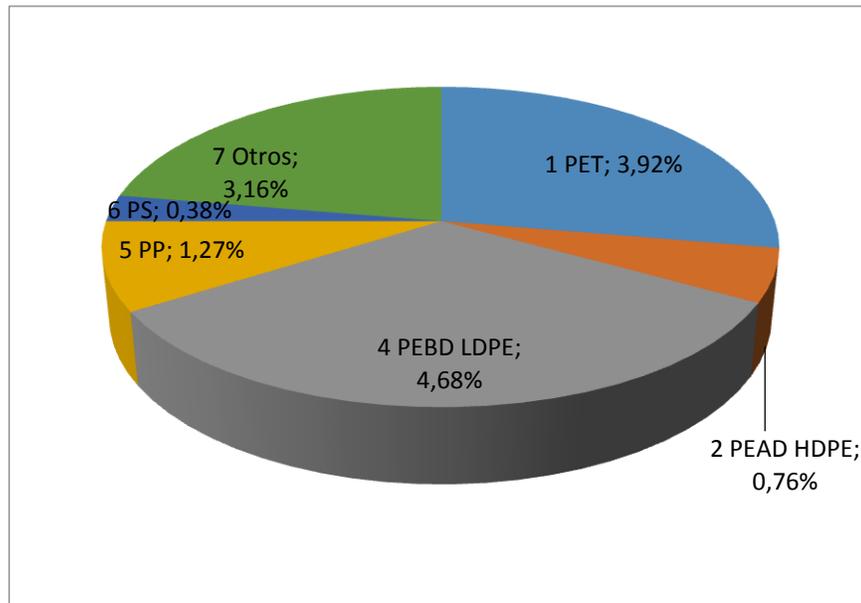
Los residuos de alimentos con un 59.20% representa nuevamente el componente de mayor presencia en la muestra evaluada, evidenciando el consumo de la población en este sentido y la contribución de los alimentos en ocupar volumen de los hogares y del relleno, seguido tenemos los plásticos con un 14.17 % (Figura 15) y otros residuos con un 14.04%.

**Figura 14** Composición Porcentual de la muestra sector oficial municipio de Pamplona.



**Fuente:** López y Rivera, 2018

**Figura 15** Distribución porcentual de plásticos sector Ruta 2 municipio de Pamplona.



**Fuente:** López y Rivera, 2018

El PEBD con un 4.68% se posiciona como el plástico de mayor generación en los hogares seguido del PET con un 3.92% que aumenta su representación en comparación con la ruta 1 y la otra categoría que resalta con los otros con un 3.16%.

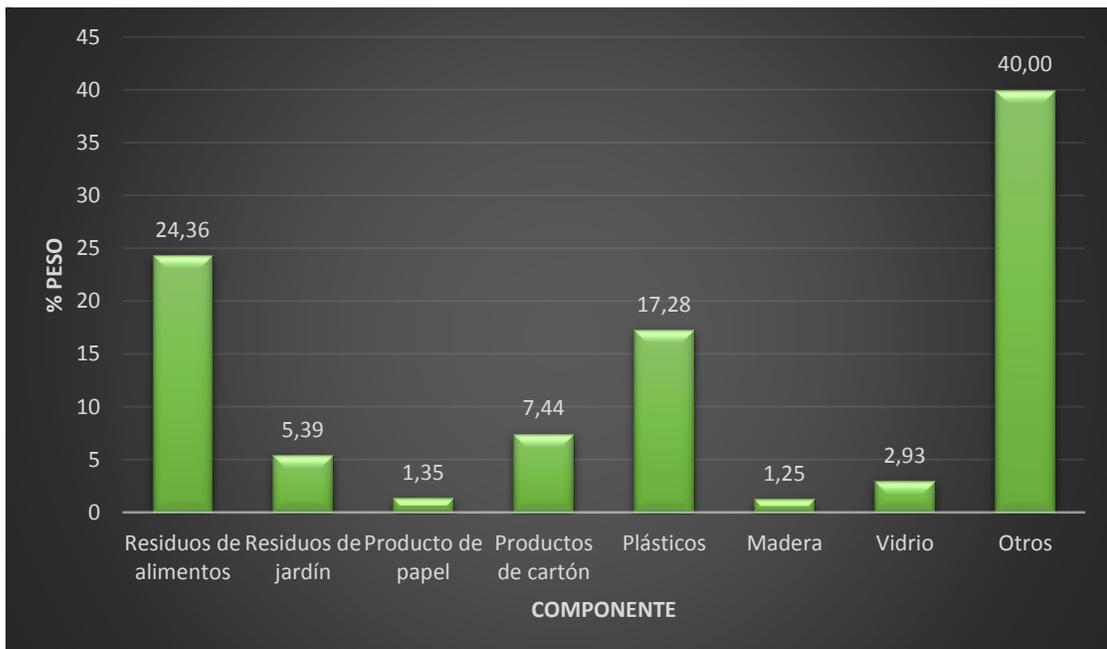
### 6.1.2.2 Pamplonita

En el municipio de Pamplonita se caracterizaron el sector oficial y los estratos 1,2 y 3 obteniendo los resultados que se presentan a continuación.

#### 6.1.2.2.1 Pamplonita, Sector Oficial.

El sector oficial de pamplonita se tomó las muestras correspondientes para realizar la caracterización plasmada en la Figura 16.

**Figura 16** Composición Porcentual de la muestra sector oficial municipio de Pamplonita

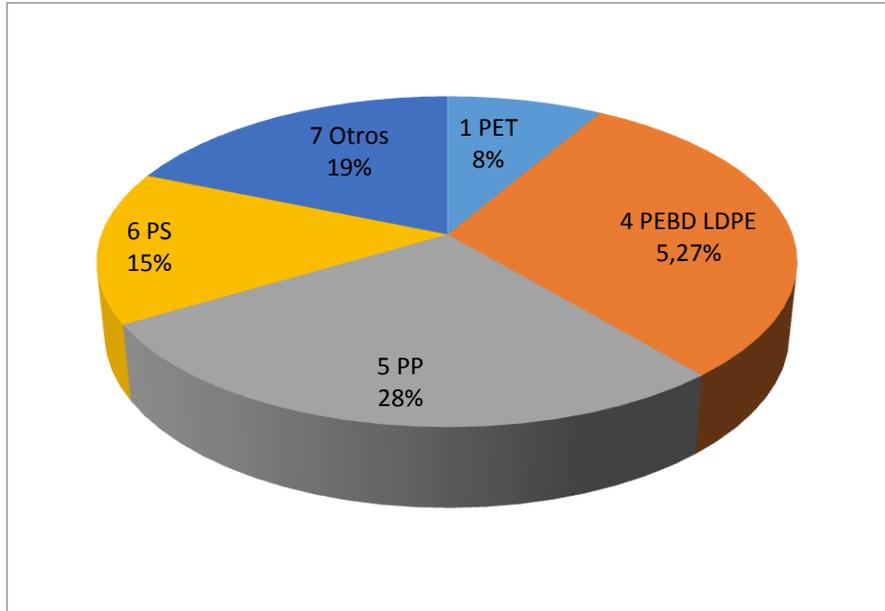


**Fuente:** López y Rivera, 2018

En la composición porcentual la categoría otros con un 40% representan los residuos de mayor presencia en el sector oficial, seguido de los alimentos con un 24.36% y los plásticos 17.28% que su caracterización está en la Figura 17.

De la distribución porcentual de los plásticos, la mayor representación se centra en los PP con un 28%, otros con un 19% y PET con un 8 % del total de plásticos del sector oficial de Pamplonita.

**Figura 17** Distribución porcentual de plásticos sector oficial municipio de Pamplonita.

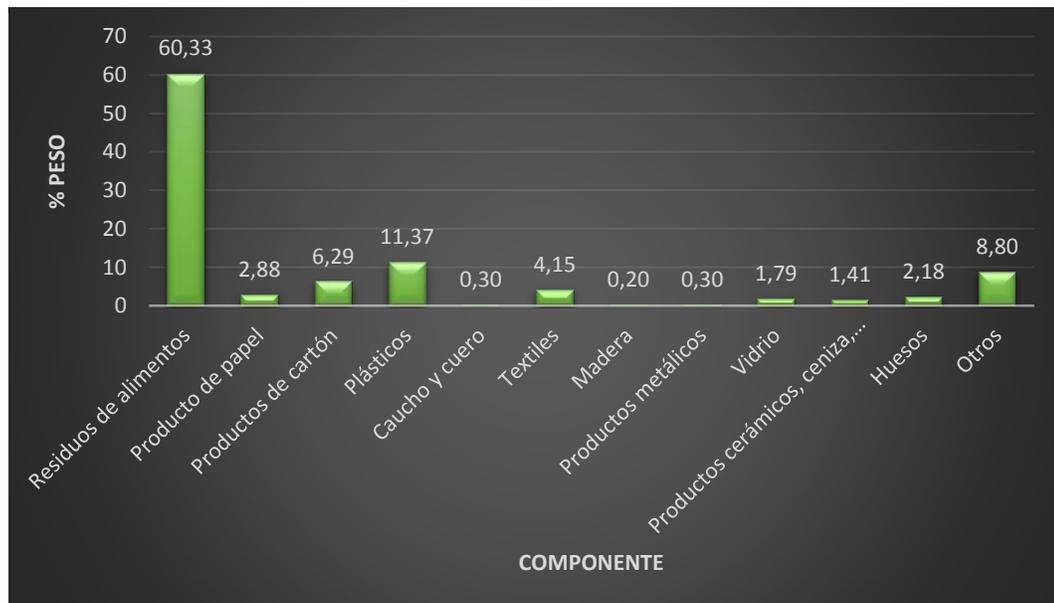


Fuente: López y Rivera, 2018

#### 6.1.2.2.2 Pamplonita, Estrato 1.

En la Figura 18 se evidencia la distribución porcentual del estrato 1 del municipio de Pamplonita.

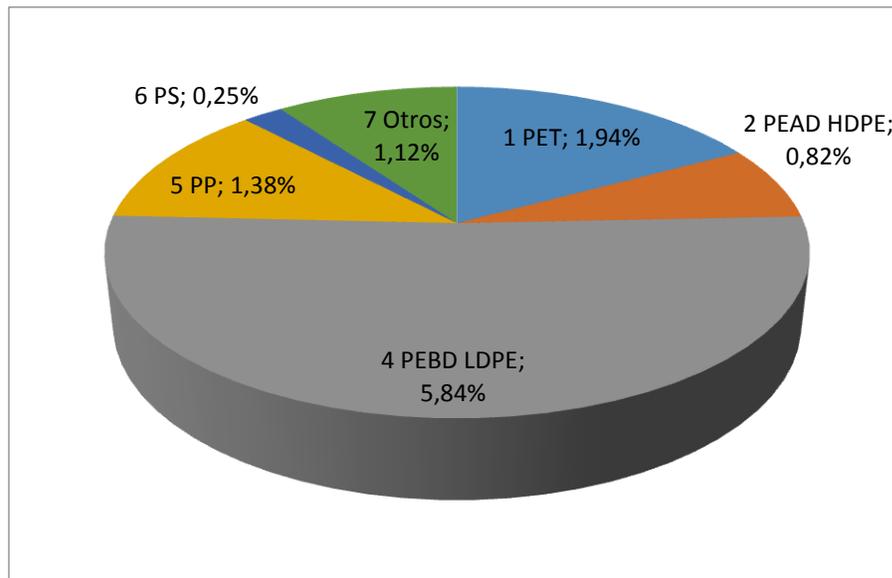
**Figura 18** Composición Porcentual de la muestra Estrato 1 municipio de Pamplonita.



Fuente: López y Rivera, 2018

Los residuos de alimentos con un 60.33% del peso total caracterizado, es el componente de mayor producción en los hogares estrato 1, seguido con un porcentaje mucho menor por plástico 11.37% (Figura 19) y otros con un 8.80%.

**Figura 19** Distribución porcentual de plásticos sector estrato 1 municipio de Pamplonita.



**Fuente:** López y Rivera, 2018

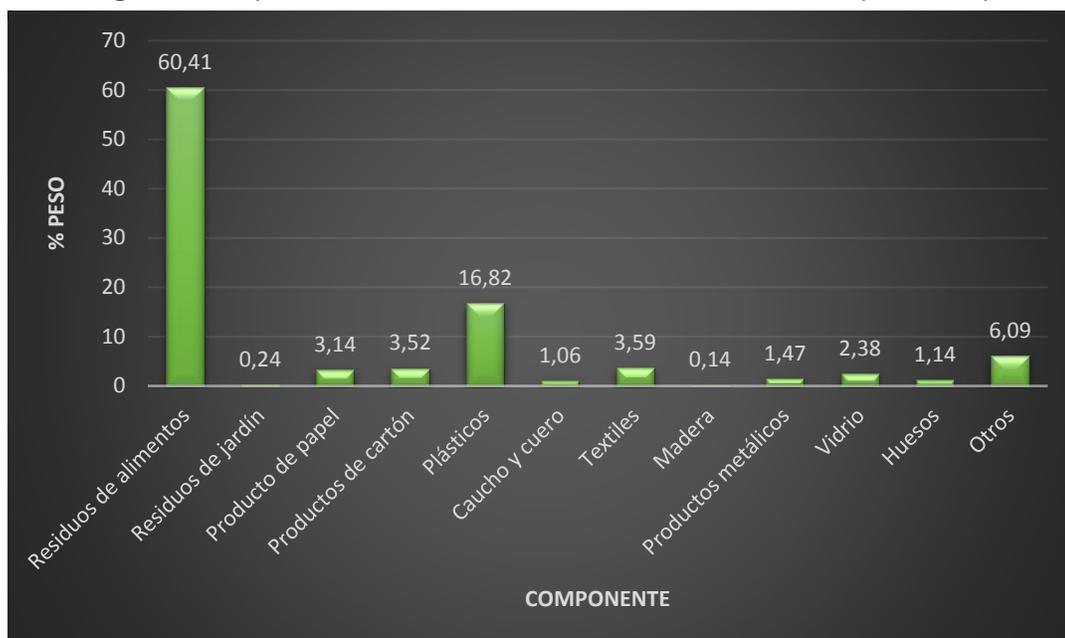
El plástico es el segundo componente de generación en los estratos 1 del municipio, dentro de su clasificación tenemos que con un 5.84% los PEBD son el tipo de plástico de mayor generación seguido de los PET 1.94% y los PP con un 1.38%

#### **6.1.2.2.3 Pamplonita, Estrato 2.**

En la Figura 20 se evidencia la distribución porcentual se los residuos caracterizados para el estrato 2 en el municipio de Pamplonita.

El estrato 2 del municipio de Pamplonita en su caracterización de residuos sólidos, los de mayor generación tenemos a los alimentos con un 60.41%, seguido de los plásticos con un 16.82% (Figura 21) y otros con un 6.09%.

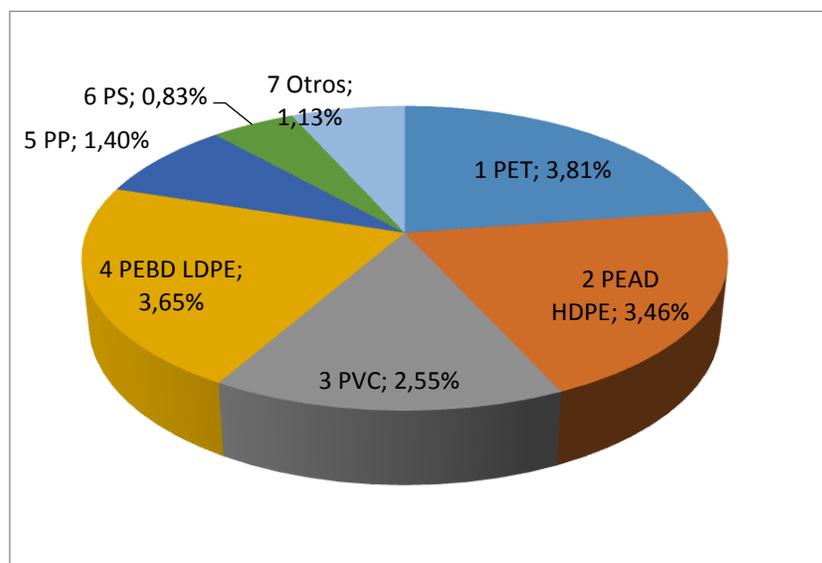
**Figura 20** Composición Porcentual de la muestra sector estrato 2 municipio de Pamplonita.



Fuente: López y Rivera, 2018

En el estrato 2 se presentaron las 7 clase de plásticos en las cuales se clasifica dicho componente, siendo las de mayor presencia el PET con un 3.81% el PEBD con un 3.65% y el PEAD HDPE con un 3.46%

**Figura 21** Distribución porcentual de plásticos sector estrato 2 municipio de Pamplonita.

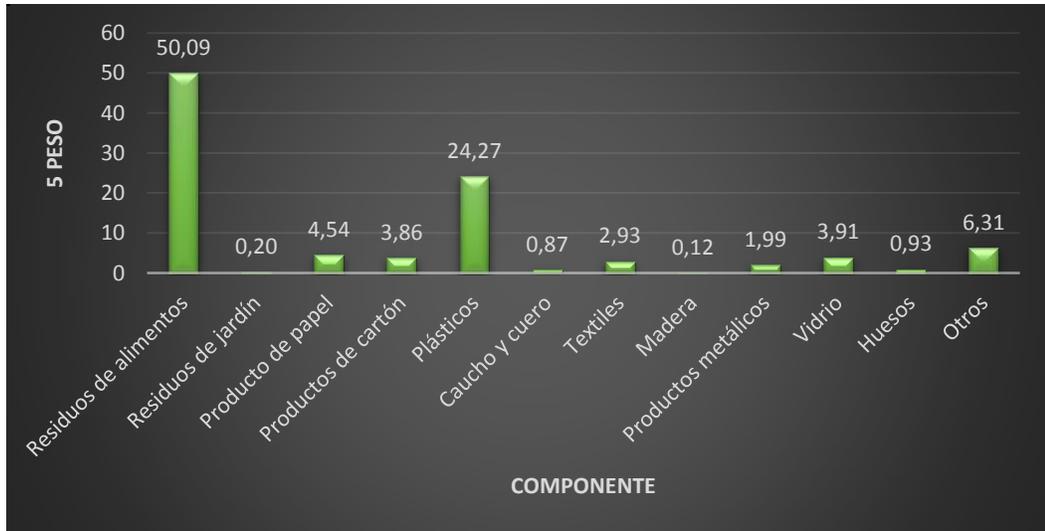


Fuente: López y Rivera, 2018

### 6.1.2.2.4 Pamplonita, Estrato 3.

Pamplonita dentro de su distribución cuenta con estrato 3 el cual también fue caracterizado y debidamente tabulada la información, como se aprecia en la Figura 22.

**Figura 22** Composición Porcentual de la muestra sector estrato 3 municipio de Pamplonita.

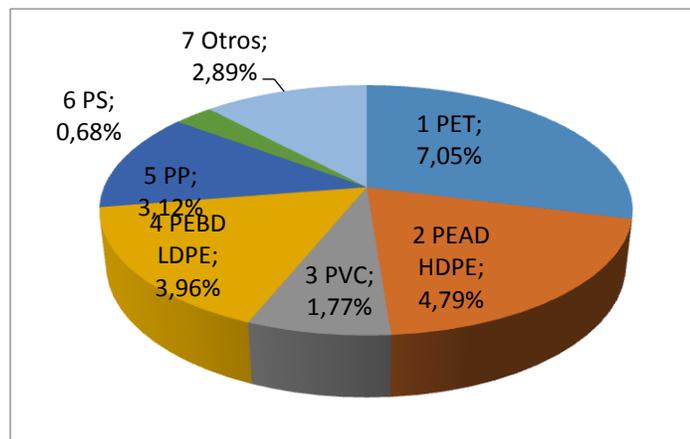


**Fuente:** López y Rivera, 2018

De acuerdo a

los resultados obtenidos de la caracterización, en este estrato predominan los residuos provenientes de alimentos con un 50.09% seguido de los plásticos con un 24.27% (Figura 23) y otros con un 6.31%

**Figura 23** Distribución porcentual de plásticos sector estrato 3 municipio de Pamplonita.



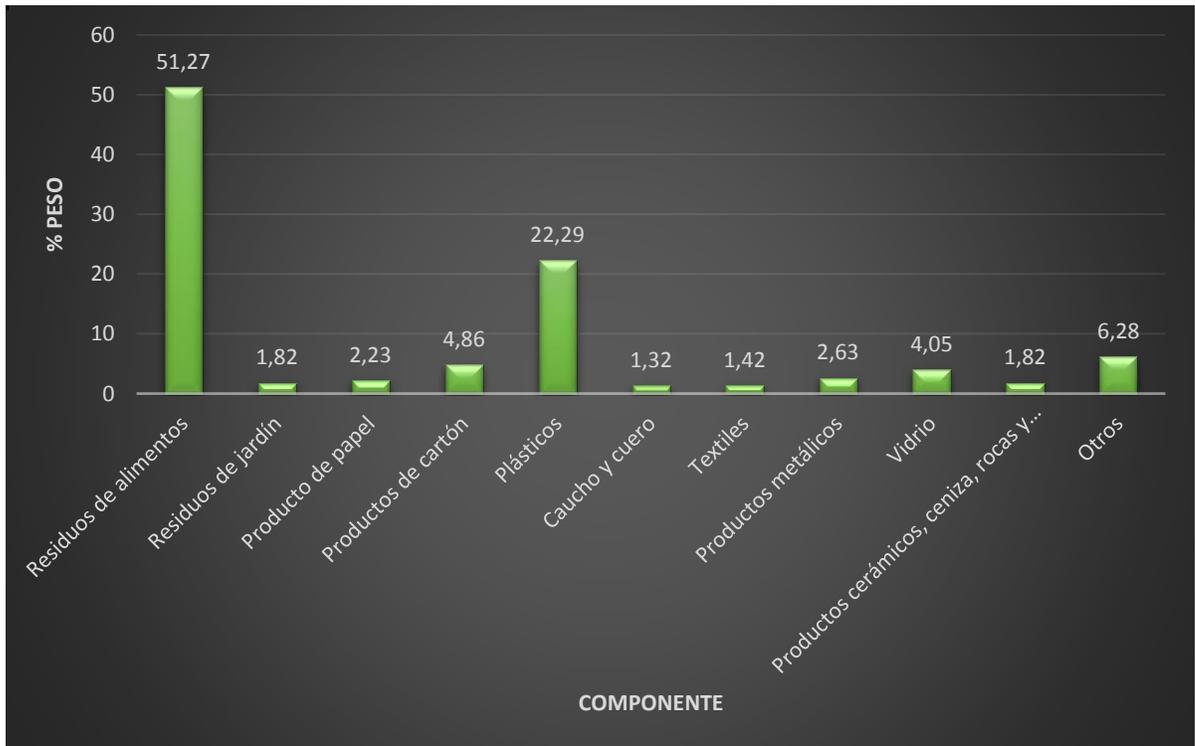
**Fuente:** López y Rivera, 2018

En la clasificación de plásticos en el estrato 3 del municipio de pamplonita, los de mayor representación son el PET con un 7.05%, el PEAD con un 4.79% y el PP de 3.96%

### 6.1.2.3 Chitagá.

En el municipio de Chitagá, todo está estructurado como estrato 2 por lo cual su caracterización fue una proporción tomada de la mayoría de sólidos generados por los habitantes como se evidencia en la Figura 24.

**Figura 24** Composición Porcentual de la muestra estrato 2 municipio de Chitagá.

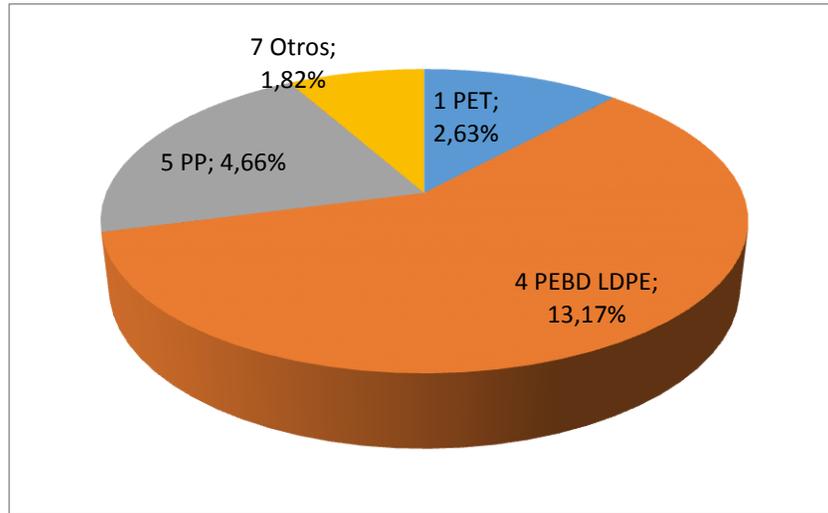


**Fuente:** López y Rivera, 2018

En este municipio los residuos que representan mayor porcentaje son los de alimentos con un 51.27% seguido de los plásticos 22.29% (Figura 25), otros con 6.28% y productos de cartón de 4.86%.

Dentro del porcentaje de plásticos en el municipio de Chitagá, los que más se generan son los PEBD con un 13.17% y los PP con un 4.66%.

**Figura 25** Distribución porcentual de plásticos estrato 2 en el municipio de Chitagá.



**Fuente:** López y Rivera, 2018

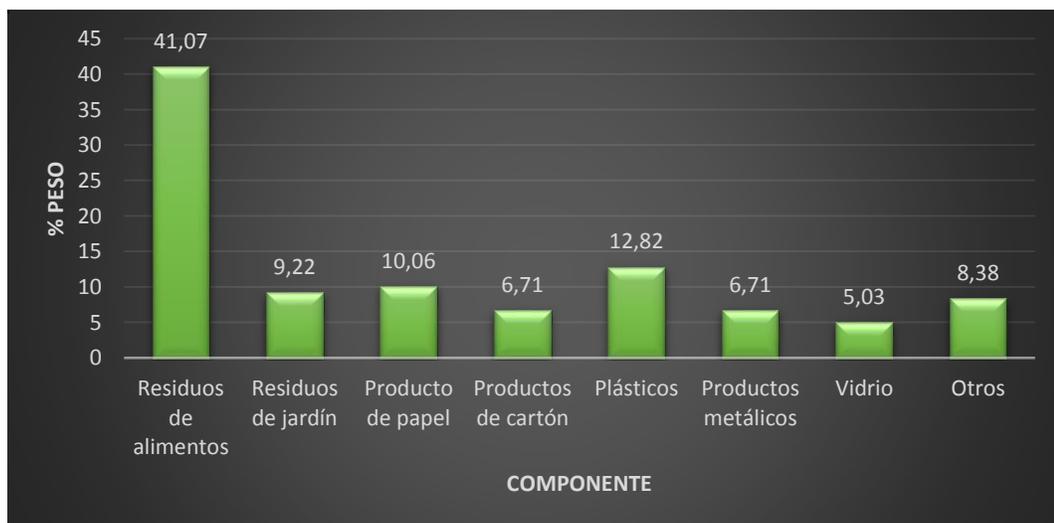
#### 6.1.2.4 Silos.

En el Municipio de Silos, se caracterizaron el sector oficial y los estratos 1 y 2.

##### 6.1.2.4.1 Sector Oficial.

En la Figura 26 se evidencia la caracterización de silos del sector oficial, del municipio de Silos.

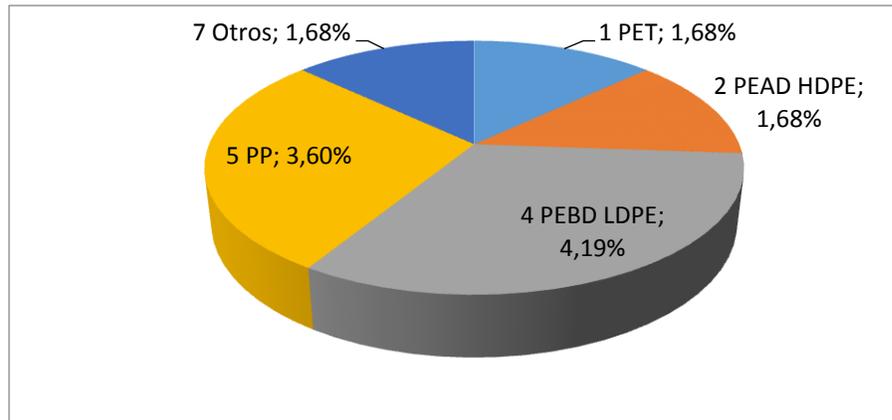
**Figura 26** Composición Porcentual de la muestra sector oficial municipio de Silos.



**Fuente:** López y Rivera, 2018

Con un 41.07% los residuos de alimentos son los de mayor generación en el sector oficial del municipio de Silos seguido con un 12.82% los plásticos (Figura 27), productos de papel con un 10.06%

**Figura 27** Distribución porcentual de plásticos sector oficial municipio de Silos.



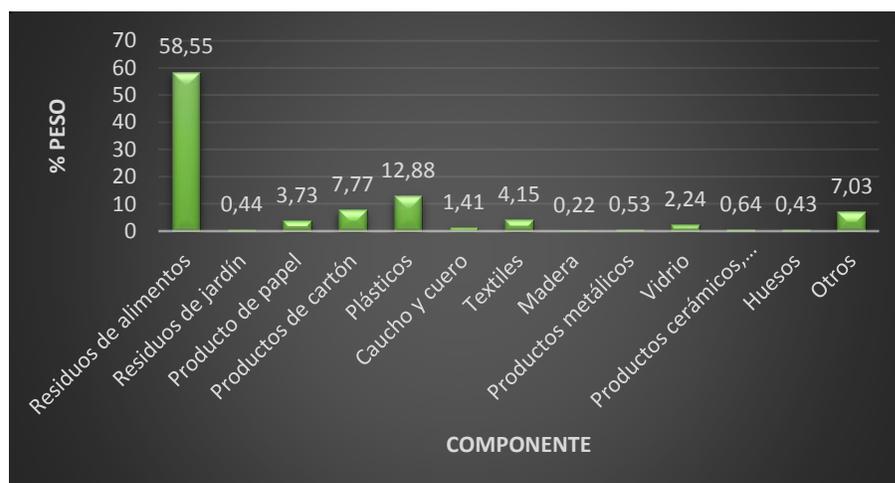
**Fuente:** López y Rivera, 2018

La distribución de porcentajes en peso en plástico lo componen en mayor porcentaje PEBD 4.19%, seguido del PP con un 3.60% en el sector oficial del municipio de Silos.

#### 6.1.2.4.2 Silos, Estrato 1.

La caracterización del estrato 1 del municipio de Silos, se encuentra en la Figura 28.

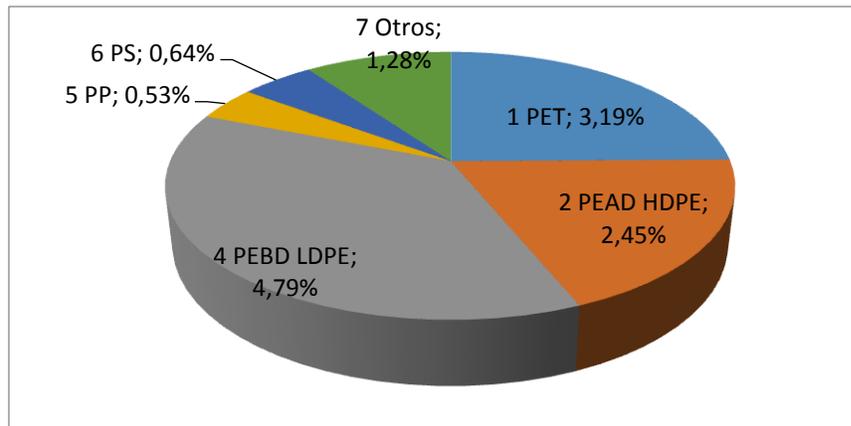
**Figura 28** Composición Porcentual de la muestra sector Estrato 1 municipio de Silos.



**Fuente:** López y Rivera, 2018

En la composición porcentual de la muestra del estrato 1 del municipio de Silos, con un 58.55% los residuos de alimentos, representa una gran generación, seguidos de los plásticos con 12.88% (Figura 29) y productos de cartón con un 7.77%.

**Figura 29** Distribución porcentual de plásticos sector estrato 1 municipio de Silos.



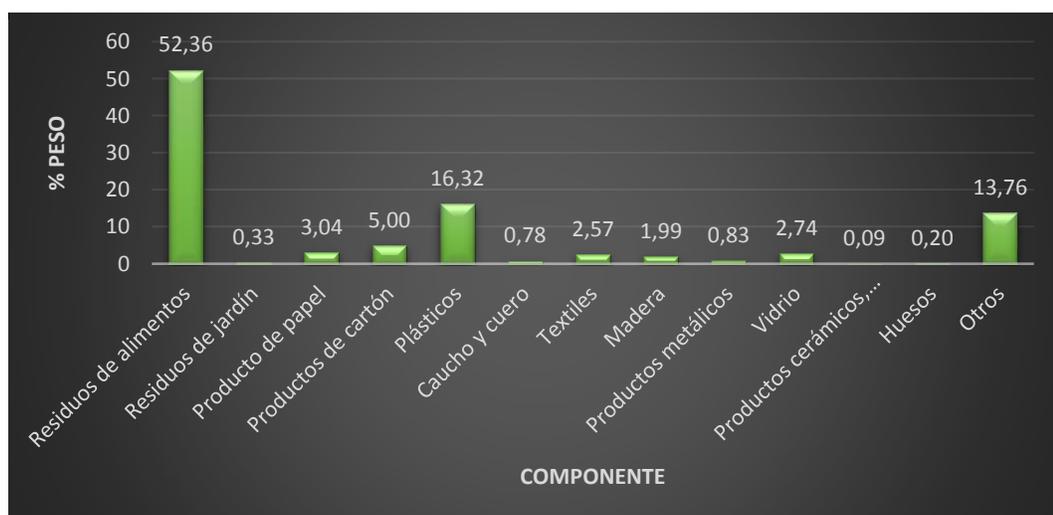
**Fuente:** López y Rivera, 2018

Con un 4.79% los PEBD es el plástico de mayor generación en el estrato 1 del municipio de Silos, seguido del PET, con un 3.19 %.

#### 6.1.2.4.3 Silos, Estrato 2.

En el estrato 2 del municipio de silos se realizó la caracterización de los residuos sólidos y la distribución porcentual del peso se encuentran en la Figura 30.

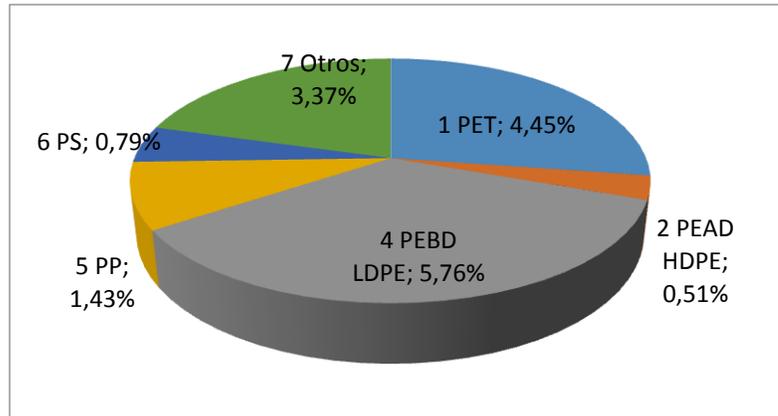
**Figura 30** Composición Porcentual de la muestra Estrato 2 municipio de Silos.



**Fuente:** López y Rivera, 2018

En la composición del estrato 2 del municipio de silos, con un 52.36% los residuos de alimentos son los de mayor generación, seguidos de los plásticos con un 16.32% (Figura 31) y de otros residuos con un 13.76%.

**Figura 31** Distribución porcentual de plásticos sector estrato 2 municipio de Silos.



**Fuente:** López y Rivera, 2018

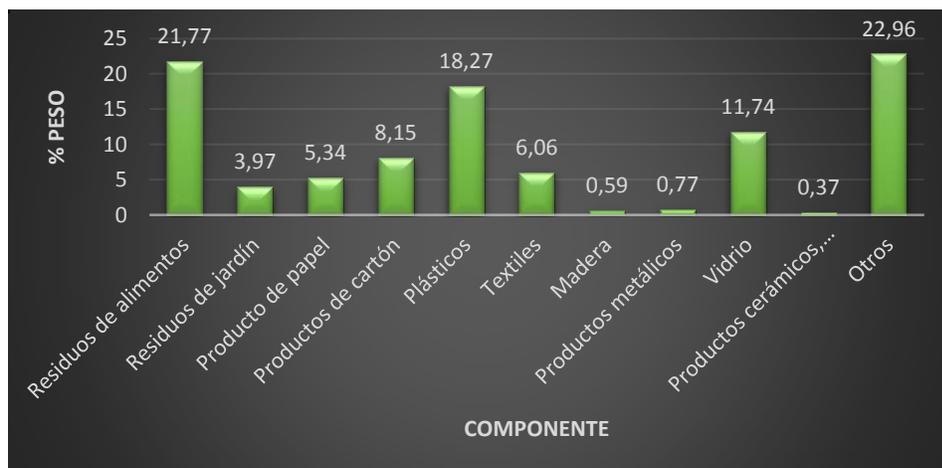
En la distribución porcentual del plástico en el estrato 2 del municipio de silos, se evidencia que el mayor porcentaje tenemos al PEBD con un 5.76% seguido del PET con un 4.45% y Otros con un 3.37%.

#### 6.1.2.5 Mutiscua.

##### 6.1.2.5.1 Mutiscua, Sector Oficial.

En el municipio de Mutiscua, se caracterizó el sector oficial y su distribución porcentual está plasmada en la Figura 32.

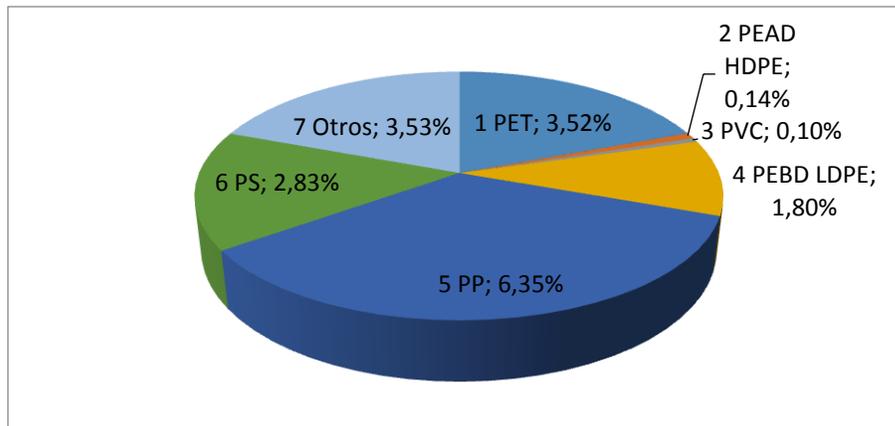
**Figura 32** Composición Porcentual de la muestra sector oficial municipio de Mutiscua.



**Fuente:** López y Rivera, 2018

En el sector oficial del municipio de Mutiscua, con un 22.96% otros residuos son los de mayor generación, seguido de los residuos de alimentos con un 21.77% y los plásticos con un 18.27 % (Figura 33).

**Figura 33** Distribución porcentual de plásticos sector oficial municipio de Mutiscua.



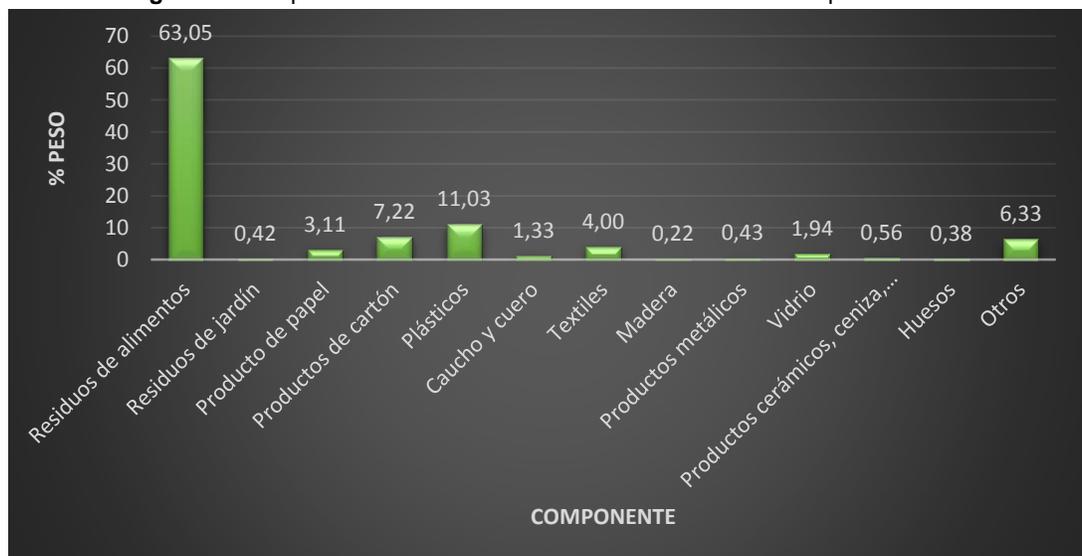
**Fuente:** López y Rivera, 2018

En la distribución de los plásticos, del sector oficial del municipio de Mutiscua, los de mayor porcentaje son el PP 6.35%, otros con un 3.53% y PET con un 3.52%.

#### 6.1.2.5.2 Mutiscua, Estrato 1.

En la Figura 34 se encuentra la composición porcentual de la muestra del estrato 1 del municipio de Mutiscua.

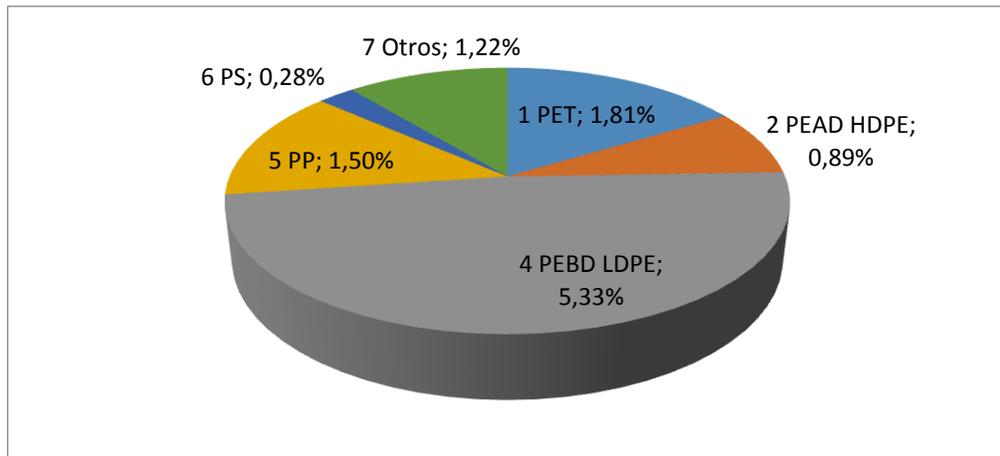
**Figura 34** Composición Porcentual de la muestra Estrato 1 municipio de Mutiscua.



**Fuente:** López y Rivera, 2018

En el estrato 1 el residuo de mayor producción son lo de alimentos con un 63.05% seguido de los plásticos con un 11.03% (Figura 35) y productos de cartón con un 7.22%.

**Figura 35** Distribución porcentual de plásticos sector estrato 1 municipio de Mutiscua.



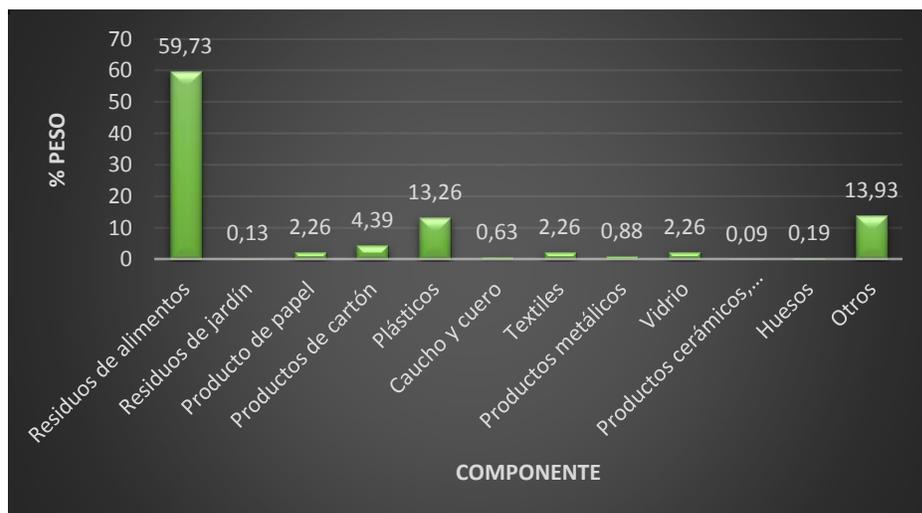
**Fuente:** López y Rivera, 2018

En el componente de Plásticos, se encuentra en mayor porcentaje el PEBD, con un 5.33% y PET con un 1.81%.

### 6.1.2.5.3 Mutiscua, Estrato 2.

La distribución porcentual de los componentes de la caracterización del Estrato 2 del municipio de Mutiscua se presenta en la Figura 36.

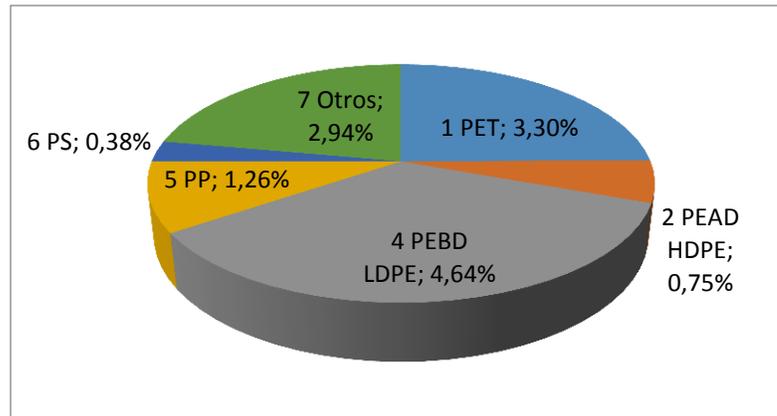
**Figura 36** Composición Porcentual de la muestra sector Estrato 2 de Mutiscua.



**Fuente:** López y Rivera, 2018

Los residuos de alimentos con un 59.73% es el componente de mayor generación en el estrato 2 del municipio de Mutiscua, seguido de la categoría de otros con un 13.93 % y plásticos con un 13.26% (Figura 37).

**Figura 37** Distribución porcentual de plásticos sector estrato 2 municipio de Mutiscua.



**Fuente:** López y Rivera, 2018

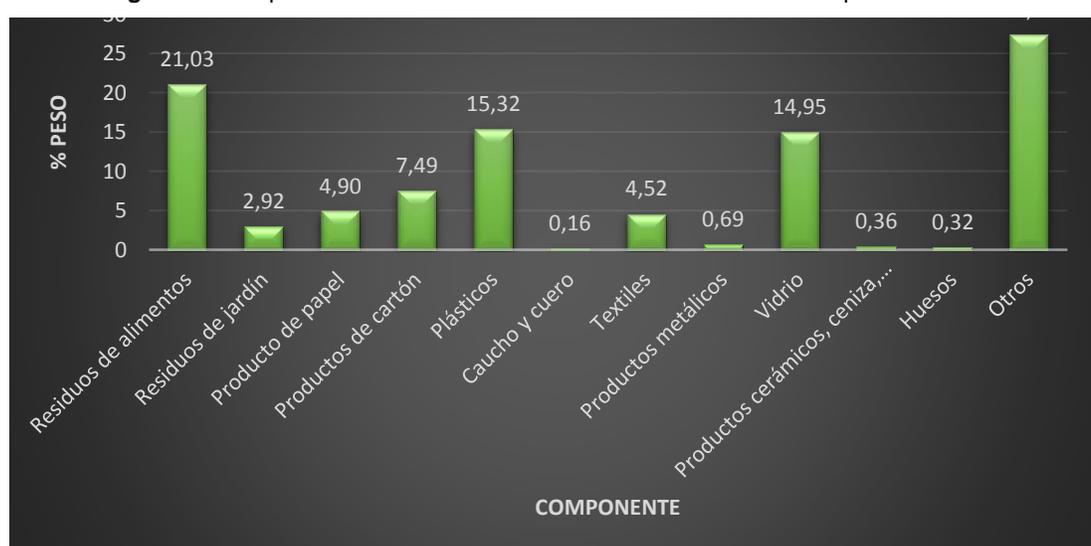
El PEBD con un 4.64% es el plástico de mayor representación en la caracterización del estrato 2 del municipio de Mutiscua, seguido del PET con un 3.30%.

#### 6.1.2.6 Cécota.

##### 6.1.2.6.1 Sector Oficial

En la Figura 38 la composición porcentual del sector oficial del municipio de Cécota.

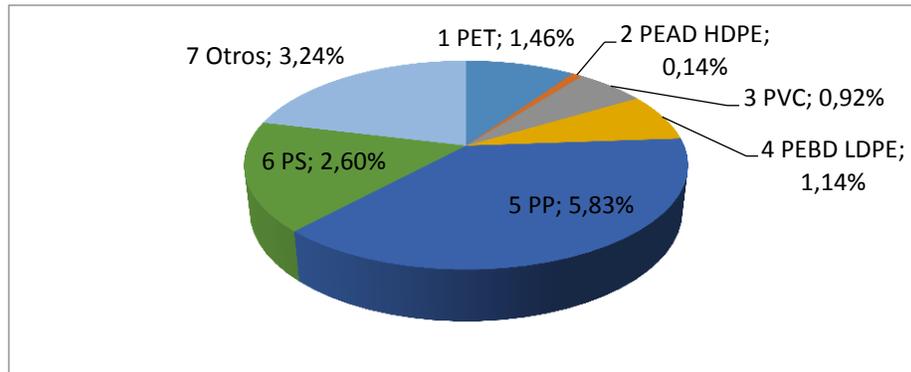
**Figura 38** Composición Porcentual de la muestra sector oficial municipio de Cécota.



**Fuente:** López y Rivera, 2018

La categoría de otros con un 27.34% lidera la composición en la caracterización del sector oficial, seguido de cerca por los residuos de alimentos con un 21.03%, seguido de los plásticos con un 15.32% (Figura 39) y el componente vidrio con un 14.95%.

**Figura 39** Distribución porcentual de plásticos sector oficial municipio de Cécota.



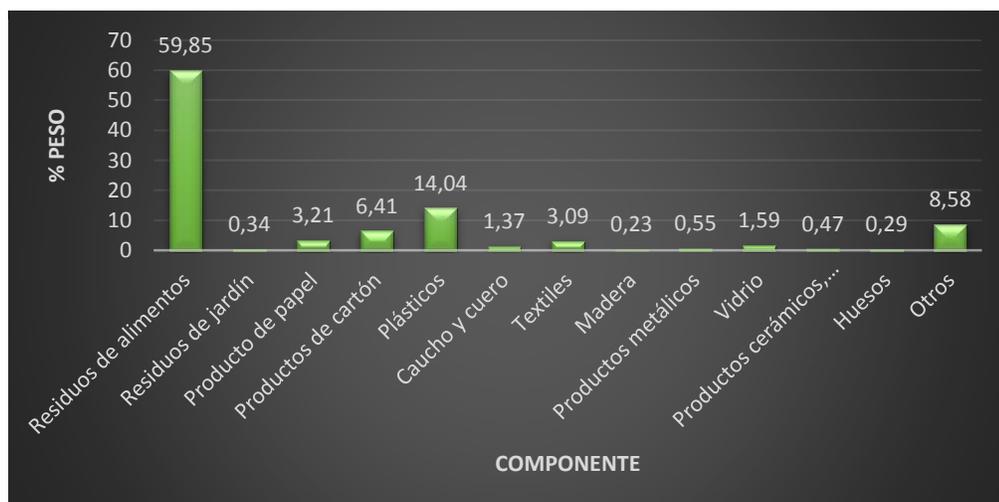
**Fuente:** López y Rivera, 2018

En la distribución de plásticos tenemos al PP con un 5.83% y otros con 3.24% como los de mayor generación en el sector oficial del municipio de Cécota.

#### 6.1.2.6.2 Cécota, Estrato 1.

En la Figura 40 se encuentra la composición porcentual de la muestra estrato 1 del municipio de Cécota.

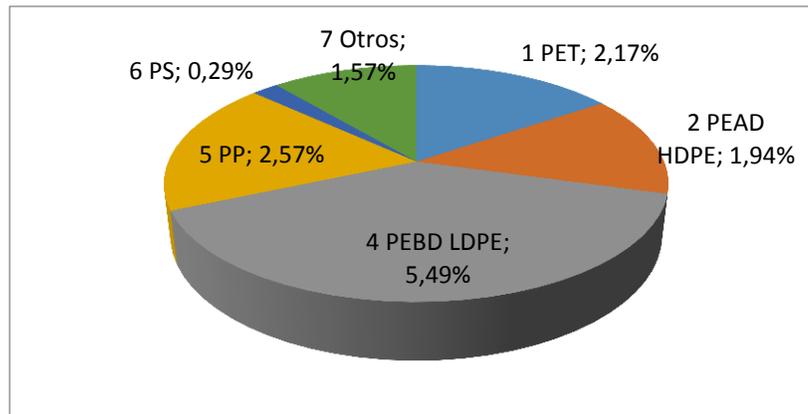
**Figura 40** Composición Porcentual de la muestra Estrato 1 municipio de Cécota.



**Fuente:** López y Rivera, 2018

Con un 59.85%, los residuos de alimentos son los componentes de mayor generación en el estrato 1 del municipio de Cácuta, seguido de los plásticos con un 14.04% cuya distribución está en la Figura 41 y en menor cantidad la madera con un 0.23 % y huesos con un 0.29%.

**Figura 41** Distribución porcentual de plásticos sector estrato 1 municipio de Cácuta.



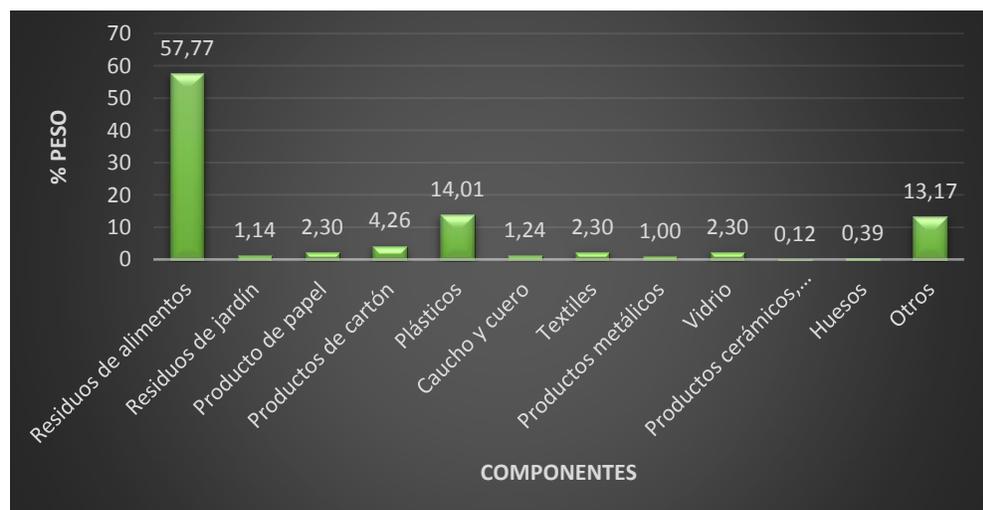
**Fuente:** López y Rivera, 2018

En la generación de plásticos en el estrato 1 del municipio de Cácuta, se tiene en mayor medida el PEBD con un 5.49% seguido del PP con un 2.57% y en menor proporción los PS con un 0.29%.

### 6.1.2.6.3 Cácuta, Estrato 2.

La caracterización del estrato 2 del municipio de Cácuta, se representa en la Figura 42.

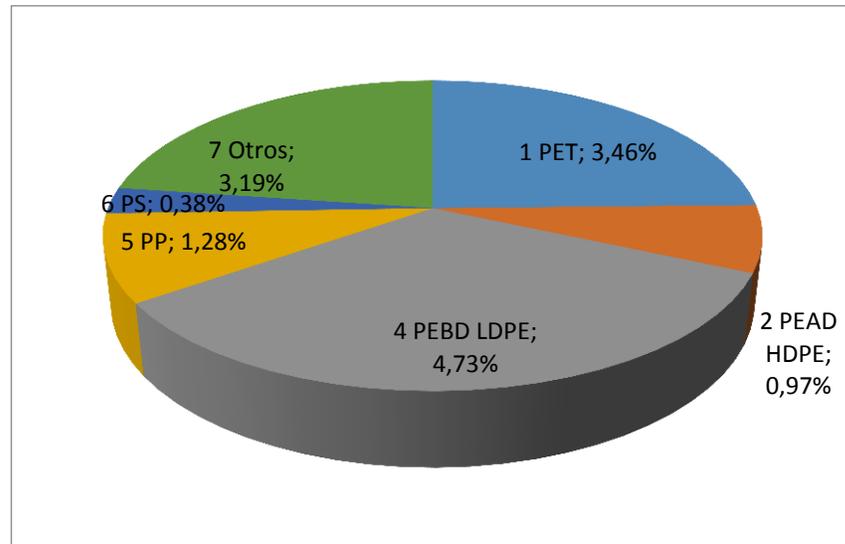
**Figura 42** Composición Porcentual de la muestra Estrato 2 municipio de Cácuta.



**Fuente:** López y Rivera, 2018

En la caracterización del estrato 2 del municipio de Cácuta la mayor proporción la obtienen los residuos de alimentos con un 57.77%, seguido de los plásticos con un 14.01% (Figura 43) y otros con un 13.17%, lo de menor presencia se tienen los productos cerámicos, cenizas y rocas con un 0.12% y los huesos con un 0.39%.

**Figura 43** Distribución porcentual de plásticos sector estrato 2 municipio de Cácuta.



**Fuente:** López y Rivera, 2018

En la distribución de plásticos del estrato 2, la mayor generación se presenta en el PEBD con un 4.73%, seguido del PET con un 3.46% y en menor peso los PS con un 0.38% y los PEAD con un 0.97%.

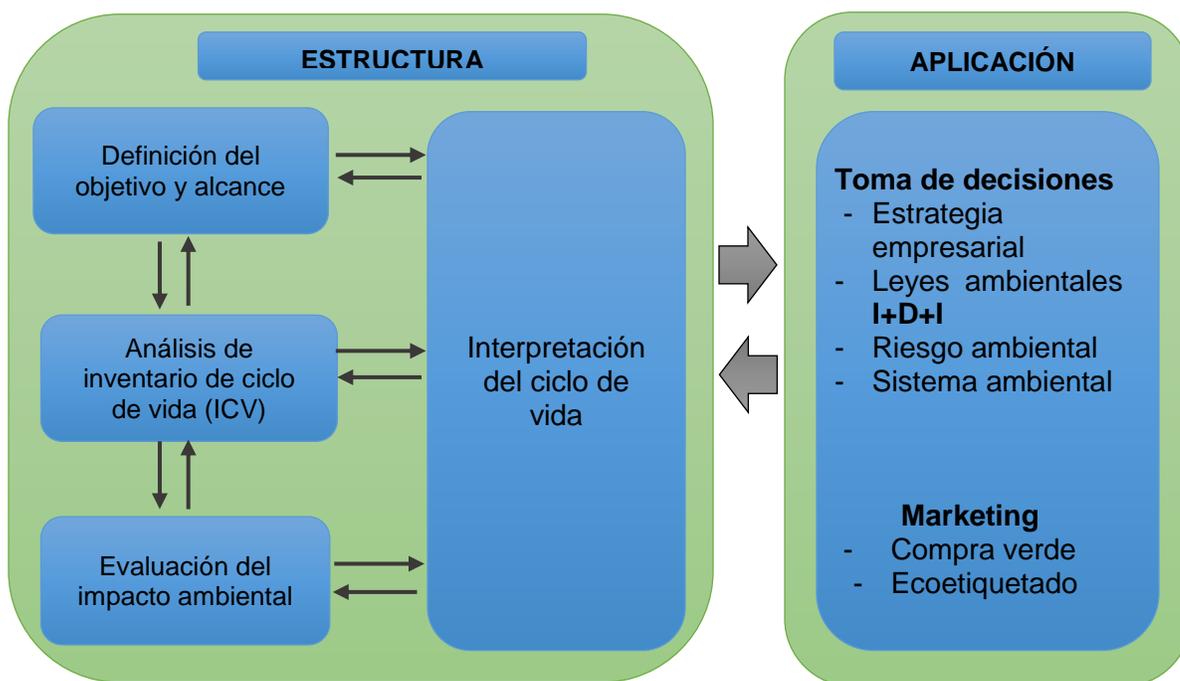
## 7. CAPITULO III. ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA

Para el análisis del ciclo de vida del relleno sanitario regional “La Cortada”, se siguió la metodología descrita en la NTC ISO 14040, la cual rige el análisis de Ciclo de Vida. En este caso, se emplea como una metodología medioambiental para evaluar cargas ambientales generadas por el proceso de aseo en la empresa Empopamplona específicamente en el relleno sanitario “La Cortada”. Se pretende que a través de este análisis se generen propuestas de mitigación de contaminación al ambiente por parte del proceso de disposición final de residuos sólidos.

### 7.1 Fases del ACV

En la Figura 44 se presenta la metodología general para llevar a cabo un análisis de ciclo de vida, estipulada por la ISO 14040.

Figura 44 Metodología general para el análisis de ciclo de vida



Fuente: Cámara, 2012., editado por López T, 2018

### **7.1.1 Definición del objetivo y el alcance**

El alcance de un ACV, incluyendo los límites del sistema y el nivel de detalle, depende del tema y del uso previsto del estudio. La profundidad y amplitud del ACV puede diferir considerablemente dependiendo del objetivo de un ACV en particular. Hay casos en los cuales el objetivo de un ACV se puede satisfacer desarrollando únicamente un análisis de inventario y una interpretación.” (ISO 14040, 2007).

Para el servicio de aseo se tuvieron en cuenta los siguientes procesos:

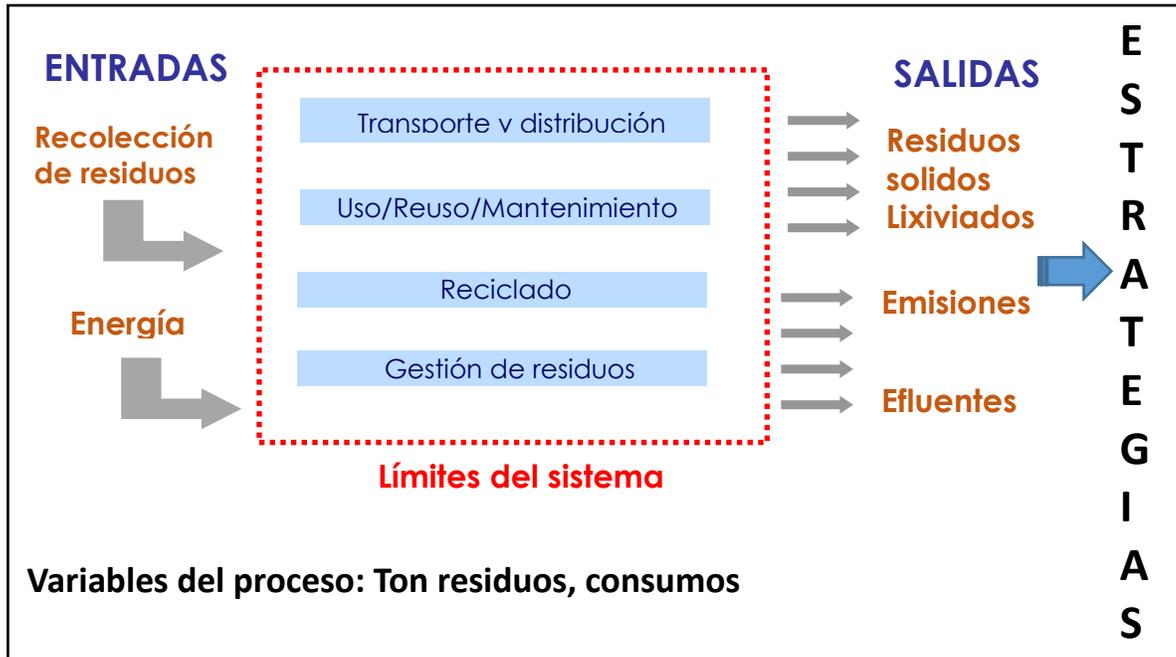
- Recolección y transporte de residuos sólidos
- Disposición final de los residuos sólidos.

Estos procesos involucran alto consumo de combustible, materiales de construcción, insecticidas en la construcción de las celdas en el relleno. Los dos procesos presentan alto impacto en la generación de gases de efecto invernadero producto tanto de la producción de CO<sub>2</sub> por combustión del buldócer como de la descomposición de residuos sólidos en el relleno. Se seleccionó como unidad funcional una tonelada de residuos sólidos en el relleno.

### **7.1.2 Análisis del inventario**

La fase de análisis del inventario del ciclo de vida es la segunda fase del ACV. Es un inventario de los datos de entrada/salida en relación con el sistema bajo estudio. Implica la recopilación de los datos necesarios para cumplir los objetivos del estudio definidos (ISO 14040, 2007).

Figura 45 Análisis de inventario del proceso de aseo



Fuente: López T, 2018

Se realizó un inventario de datos de entrada y salida del proceso de aseo teniendo en cuenta las diferentes variables que influyen en este proceso (Ver Figura 45). En esta fase se tuvieron en cuenta las cantidades de cada uno de los insumos y energía consumida.

En la etapa de búsqueda de información se tomaron dos tipos de fuentes:

#### Fuentes primarias

Con la colaboración del equipo administrativo y técnico de la empresa Empopamplona E.S.P

La información que la empresa suministro corresponde a seis meses de funcionamiento de la empresa de acuerdo a los datos actualizados del año inmediatamente anterior (2017).

Las entradas y salidas de insumos, cantidades de energía utilizadas y demás variables fueron tabuladas. La tabla de materiales se organizó tomando la cantidad de cada uno de los materiales, y se calculó su peso unitario a partir de los catálogos de los fabricantes o por medición directa y luego se multiplico por la cantidad de elementos usados y se obtuvo el valor total usado, por unidad de masa.

Posteriormente se toma el valor total y se divide por el valor de las unidades producidas en un año (m<sup>3</sup>, Ton), obteniéndose así un valor en términos de unidad de masa / unidad funcional. Para el servicio de aseo, se evaluaron 6 meses del año 2017 (enero a junio). En total 31 elementos usados, la unidad funcional es toneladas de residuos sólidos, con un total de 8679,49 toneladas en 6 meses de residuos recolectados y dispuestos en el relleno sanitario en 2017. (Ver Tabla 9)

**Tabla 9** Entrada en Toneladas de residuos sólidos al relleno sanitario regional La Cortada.

TONELADAS RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPIOS/SEMESTRE 2017							
MES	CHITAGÁ	CÁCOTA	MUTISCUA	CUCUTILLA	SILOS	PAMPLONA	TOTAL MES
ENERO	87.17	20.76	31.67	30.81	55.5	1231.9	1457.81
FEBRERO	78.5	16.9	32.2	32.1	53.8	1127.9	1341.4
MARZO	93.19	20.41	39.88	30.04	62.12	1280.4	1526.04
ABRIL	70.55	20.28	32.1	26.26	46.17	1149.6	1344.96
MAYO	88.32	17.79	39.94	29.3	51.8	1290.2	1517.35
JUNIO	82.42	20.95	32.1	29.38	48.98	1278.1	1491.93
TOTAL POR MUNICIPIO/ SEMESTRE	500.15	117.09	207.89	177.89	318.37	7358.1	8679.49

Fuente: Empopamplona, 2017.

Fuentes secundarias:

Se utilizó la base de datos Ecoinvent Version 3.1 (2014). Es una base de datos del Centro de Inventarios de Ciclo de Vida, es un centro de competencia del Instituto Federal Suizo de Tecnología de Lausana, el Instituto Paul Scherrer, los laboratorios Federales Suizos para el Ensayo de Materiales e Investigación, y el Instituto de Ciencias de la Sostenibilidad.

El objetivo de esta herramienta es establecer y proporcionar una evaluación transparente, científica e internacional del ACV y los datos de gestión de ciclo de vida, para servicio de la industria, las consultorías, las autoridades públicas, y las instituciones de investigación. Los datos y servicios que apoyan la mejora del comportamiento medioambiental de sus productos, procesos y servicios. En el software LCA manager se estimó la caracterización del año 2017. (Tabla 10).

**Tabla 10** Inventario de fuentes primarias y secundarias para el Servicio de Aseo. Caracterización 2017

FLUJO	VALOR	UNIDAD	BASE DATOS	FAMILIA	MATERIAL/PROCESO
<b>CARACTERIZACIÓN 2017</b>					
Papel	53.23	Kg	BD_Inventarios_Relleno_sanitario-copia.xls	RESIDUO ORGÁNICO	Papel

Cartón	128.36	Kg	BD_Inventarios_Relleno_sanitario-copia.xls	RESIDUO ORGÁNICO	Cartón
Residuos de alimentos	399.28	Kg	BD_Inventarios_Relleno_sanitario-copia.xls	RESIDUO ORGÁNICO	Residuos de Alimento
PET	100.54	Kg	BD_Inventarios_Relleno_sanitario-copia.xls	RESIDUO INORGÁNICO	PET
PAD HDPE	1.52	Kg	BD_Inventarios_Relleno_sanitario-copia.xls	RESIDUO INORGÁNICO	PEAD
PVC	0.00	Kg	BD_Inventarios_Relleno_sanitario-copia.xls	RESIDUO INORGÁNICO	PVC
PEBD LDPE	20.12	Kg	BD_Inventarios_Relleno_sanitario-copia.xls	RESIDUO INORGÁNICO	PEBD
PP	34.16	Kg	BD_Inventarios_Relleno_sanitario-copia.xls	RESIDUO INORGÁNICO	PP
PS	9.04	Kg	BD_Inventarios_Relleno_sanitario-copia.xls	RESIDUO INORGÁNICO	PS
Otros	14.53	Kg	BD_Inventarios_Relleno_sanitario-copia.xls	RESIDUO INORGÁNICO	OTROS
Caucho y cuero	2.70	Kg	BD_Inventarios_Relleno_sanitario-copia.xls	RESIDUO ORGÁNICO	CAUCHO
Textiles	34.00	Kg	BD_Inventarios_Relleno_sanitario-copia.xls	RESIDUO ORGÁNICO	TEXTIL
Madera	0.68	Kg	BD_Inventarios_Relleno_sanitario-copia.xls	RESIDUO ORGÁNICO	MADERA
Productos metálicos	3.97	Kg	BD_Inventarios_Relleno_sanitario-copia.xls	RESIDUO INORGÁNICO	METAL
Vidrio	64.55	Kg	BD_Inventarios_Relleno_sanitario-copia.xls	RESIDUO INORGÁNICO	VIDRIO
Productos cerámicos	1.11	Kg	BD_Inventarios_Relleno_sanitario-copia.xls	RESIDUO INORGÁNICO	CENIZA
Huesos	1.56	Kg	BD_Inventarios_Relleno_sanitario-copia.xls	RESIDUO ORGÁNICO	HUESOS
Sanitarios y otros	121.10	Kg	BD_Inventarios_Relleno_sanitario-copia.xls	RESIDUO INORGÁNICO	OTROS
Residuos de jardín	9.53	Kg	BD_Inventarios_Relleno_sanitario-copia.xls	RESIDUO ORGÁNICO	MADERA
<b>Operación</b>					
ACPM	0.70	Kg	BD_Inventarios_Relleno_sanitario-copia.xls	CONSUMIBLE	ACPM
Aceite Hidráulico	0.00	Kg	BD_Inventarios_Relleno_sanitario-copia.xls	CONSUMIBLE	Aceite

Gasolina	0.08	Kg	BD_Inventarios_Relleno_sanitario-copia.xls	CONSUMIBLE	Gasolina
Electricidad	0.19	KWh	BD_Inventarios_Relleno_sanitario-copia.xls	CONSUMIBLE	Electricidad
Relleno	7.18	Kg	BD_Inventarios_Relleno_sanitario-copia.xls	CONSUMIBLE	Grava
PVC	0.01	Kg	BD_Inventarios_Relleno_sanitario-copia.xls	CONSUMIBLE	PVC
Geotextil	0.02	Kg	BD_Inventarios_Relleno_sanitario-copia.xls	CONSUMIBLE	Geotextil/polipropileno
Polipropileno	0.01	Kg	BD_Inventarios_Relleno_sanitario-copia.xls	CONSUMIBLE	Geotextil/polipropileno
Polisombra	0.00	Kg	BD_Inventarios_Relleno_sanitario-copia.xls	CONSUMIBLE	Polisombra
Alambre	0.03	Kg	BD_Inventarios_Relleno_sanitario-copia.xls	CONSUMIBLE	Malla/Alambra
Malla	0.06	Kg	BD_Inventarios_Relleno_sanitario-copia.xls	CONSUMIBLE	Malla/Alambra
Insecticida	0.00	Kg	BD_Inventarios_Relleno_sanitario-copia.xls	CONSUMIBLE	Insecticida

Fuente: López T, 2018

### 7.1.3 Evaluación del impacto ambiental

La fase de evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV) es la tercera fase del ACV. El objetivo de la EICV es proporcionar información adicional para ayudar a evaluar los resultados del inventario del ciclo de vida (ICV) de un sistema del producto a fin de comprender mejor su importancia ambiental. (ISO 14040, 2007).

Para la evaluación del impacto se usa la metodología CML 2001 (Frischknecht R. et al., 2007) considerando la base de datos Ecoinvent 3.1.

En esta investigación se calcularon los factores de emisiones para el indicador ambiental del Calentamiento Global debido a la importancia y relevancia que tiene este indicador con el fin de buscar alternativas que reduzcan el impacto de la prestación de los servicios públicos.

Por lo tanto, se evaluaron las emisiones de gases de efecto invernadero tomando los factores expresados en el Potencial de Calentamiento Global con un horizonte de tiempo 100 años (GWP100) y medidos en kg CO<sub>2</sub>-Equivalentes por Unidad Funcional UF. El ámbito geográfico de este indicador es a escala global. Se agregaron algunos factores de caracterización del método 100 GWP IPCC 2001: El metano, bromodifluoro, Halon 1201, metano, dichlorofluoro, HCFC-21, y el metano, iodotrifluoro (Frischknecht R. et al., 2007). Así mismo se tomaron en consideración los GEI como CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, y CFCs. Su medida se hará relativa

respecto al efecto producido por un kg de CO<sub>2</sub> y se calculará mediante la ecuación 3:

$$CCI = \sum GWP \times m \quad \text{Ec (3)}$$

Donde (m) es la masa de la sustancia i expresada en kg y GWP es el potencial de calentamiento global, un factor desarrollado para comparar las emisiones de diferentes gases invernaderos. Se define como la relación entre la contribución a la absorción de calor resultante de la emisión de 1 kg de un gas con efecto invernadero y la emisión equivalente de CO<sub>2</sub> a lo largo de un tiempo T (100):

$$GWP_{T,i} = \frac{\int_0^T a_i c_i(t) dt}{\int_0^T a_{CO_2} c_{CO_2}(t) dt}$$

Donde ai es el calentamiento producido por el aumento de la concentración de un gas i, W·m<sup>-2</sup>·kg<sup>-1</sup> y ci(t) es la concentración del gas i en el tiempo t, kg·m<sup>3</sup>. Los valores correspondientes al CO<sub>2</sub> se incluyen en el denominador. Los valores de GWP son publicados periódicamente por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático-IPCC. (Vallejo, 2004)

#### 7.1.4 interpretación

Esta es la última etapa del Análisis del ciclo de vida. Contiene información gráfica y numérica en relación con los contaminantes del proceso de disposición de residuos sólidos en el relleno.

Se analizaron individualmente los datos primarios y secundarios. Los datos obtenidos se llevaron al LCA para su análisis. Se calculan los datos de emisión de Gases de Efecto Invernadero GEI. En el software LCA manager se estimó con datos de la caracterización del año 2017.

#### 7.2 Modelación y simulación en el software LCA manager

La acción total de la operación de 6 meses del año 2017 del proceso de disposición final tiene una generación de:

El resultado de la caracterización realizada en el año 2017 genero: 1.118 E +03 kg CO<sub>2</sub> eq/ton.

### 7.2.1 Calentamiento Global

El resultado de la caracterización realizada en el año 2017 genero: 1.118 E +03 kg CO<sub>2</sub> eq/ton.

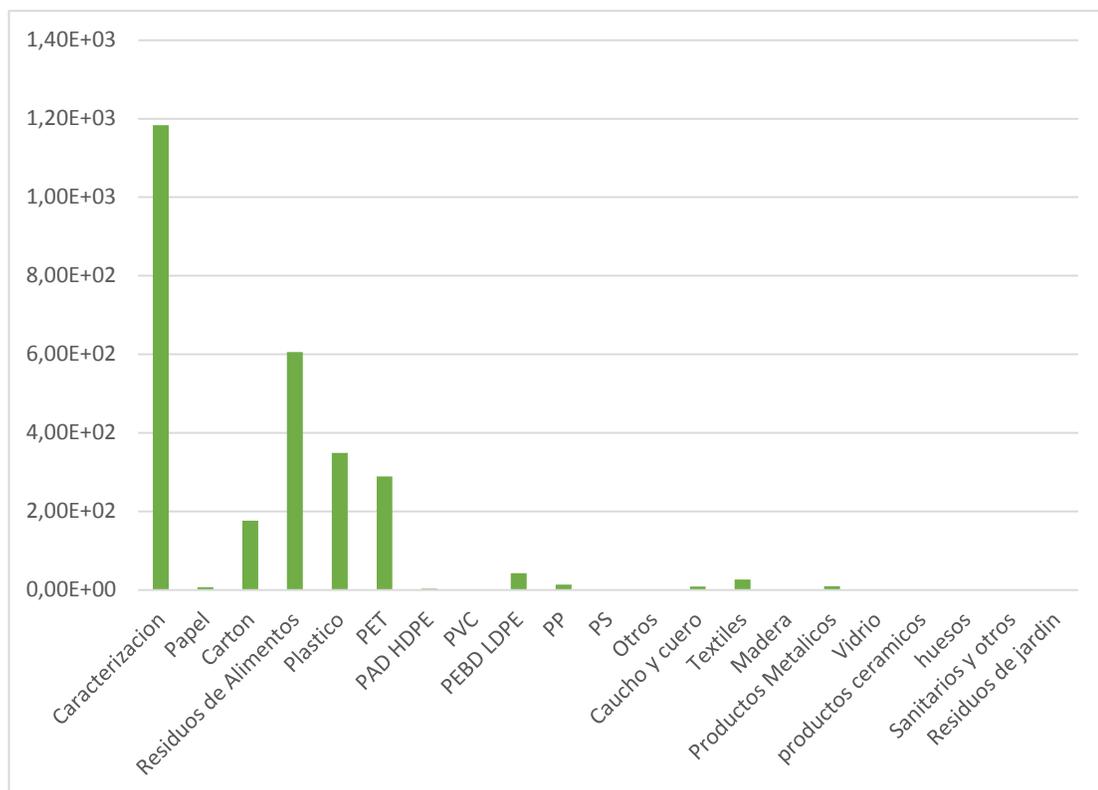
El resultado de la operación, construcción de celdas y mantenimiento género en el año 2017: 1.73 E+07 1.118 E +03 kg CO<sub>2</sub> eq/ton.

Los elementos de mayor Impacto GWP en el calentamiento global en unidades de Kg CO<sub>2</sub> eq. por componente son:

- Residuos de alimentos 6.06 E+02 kg CO<sub>2</sub> eq/ton.
- Plástico 3.49 E+02 kg CO<sub>2</sub> eq/ton (PET 2.89 E +02 kg CO<sub>2</sub> eq/ton, PEBD LDPE 2.96 E +02 kg CO<sub>2</sub> eq/ton).
- Textiles 2.60 E+01 kg CO<sub>2</sub> eq/ton).

Los resultados de la caracterización referentes al impacto en el calentamiento global por componente se presentan en la Figura 46.

**Figura 46** CML 2001-Calentamiento global (Kg CO<sub>2</sub> eq)



Fuente: López T, 2018

### 7.2.2 Destrucción de la capa de ozono

El resultado de la caracterización realizada en el año 2017 genero: 3.08 E-05 Kg CFC-11 eq.

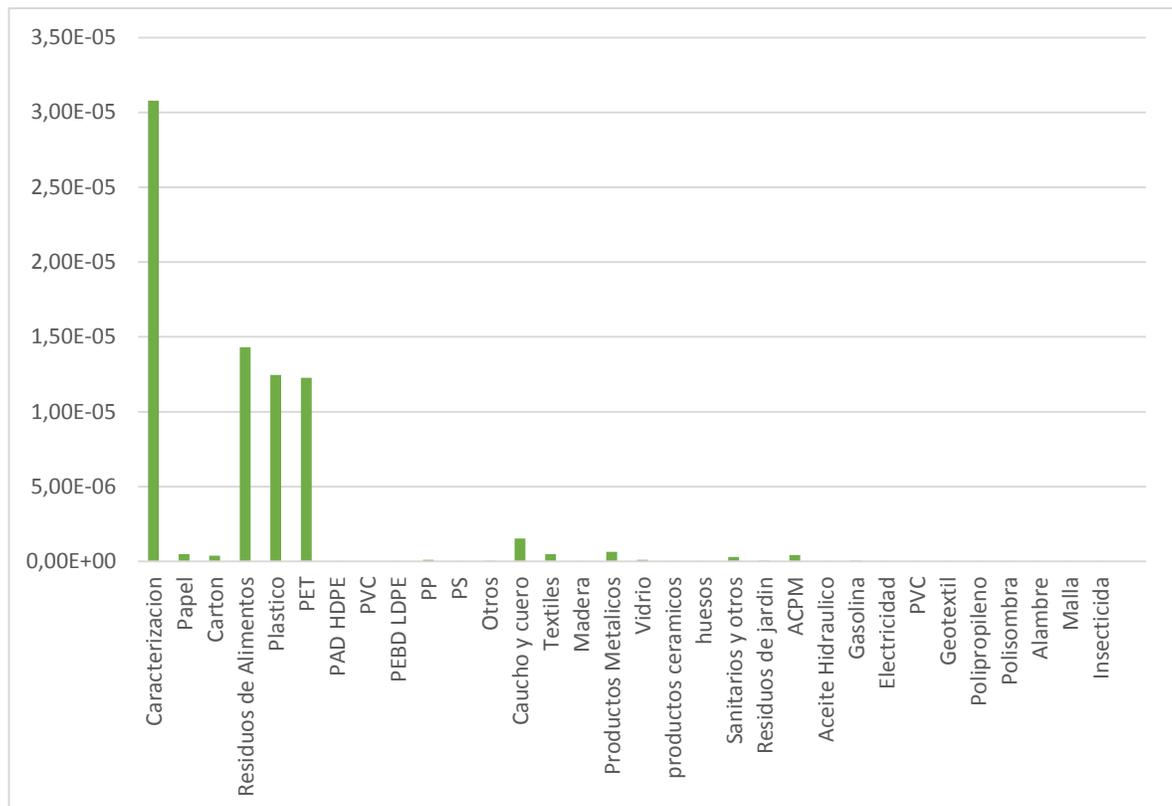
El resultado de la operación, construcción de celdas y mantenimiento género en el año 2017: 3.08 E-05 Kg CFC-11 eq.

Los elementos de mayor Impacto GWP en la destrucción de la capa de ozono en unidades de Kg CFC-11 eq. por componente son:

- Residuos de alimentos: 6.06 E+02 Kg CFC-11 eq
- Plástico: 3.49 E+02 Kg CFC-11 eq
- PET: 1.23 E-09 Kg CFC-11 eq
- Caucho y cuero: 1.54 E-06 Kg CFC-11 eq
- Productos Metálicos: 6.37 E-07 Kg CFC-11 eq
- Textiles: 4.94 E-07 Kg CFC-11 eq
- Papel: 4.85 E-07 Kg CFC-11 eq
- Cartón: 3.74 E-07 Kg CFC-11 eq

Los resultados de la caracterización referentes al impacto en la destrucción de la capa de ozono por componente se presentan en la Figura 47.

Figura 47 CML 2001-Destruccion capa de ozono (Kg CFC-11 eq)



Fuente: López T, 2018

### 7.2.3 Toxicidad Humana

El resultado de la caracterización realizada en el año 2017: 2.87 E+02 Kg 1,4-DCB eq.

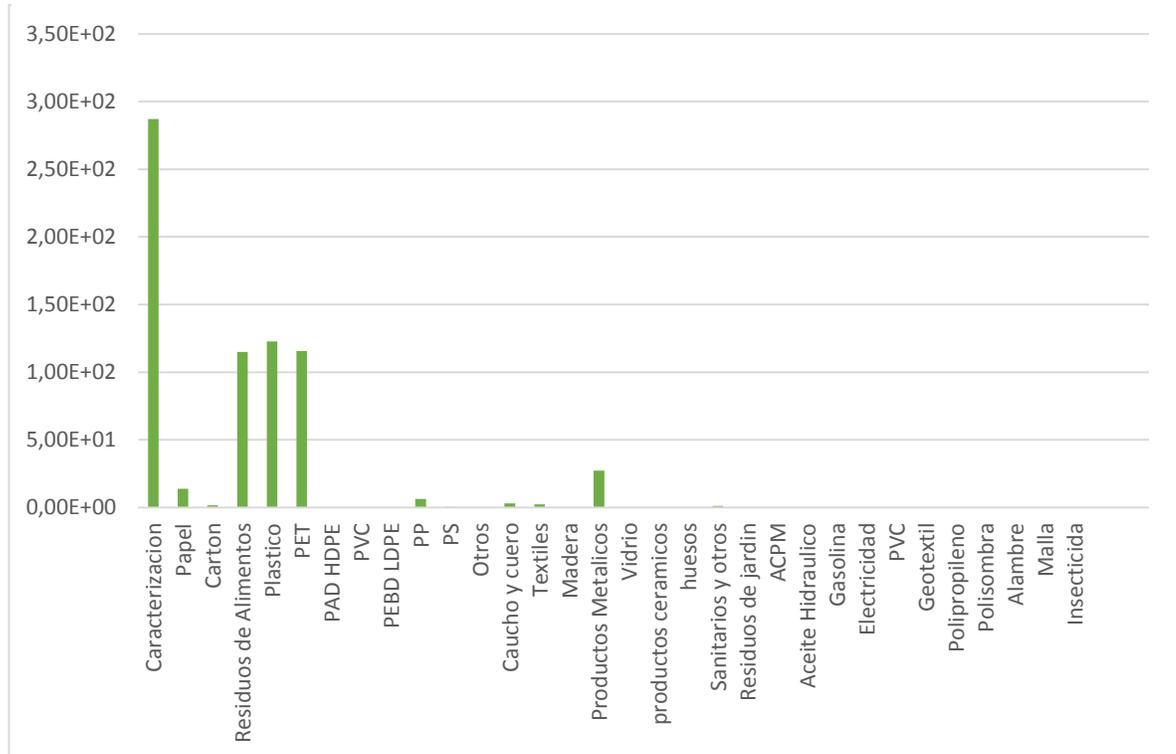
El resultado de la operación, construcción de celdas y mantenimiento género en el año 2017: 5.03 E+07 Kg 1,4-DCB eq.

Los elementos de mayor Impacto GWP en la toxicidad humana en unidades de Kg 1,4-DCB eq. por componente son:

- Residuos de alimentos: 1.15 E +02 Kg 1,4-DCB eq
- Plástico: 1.23 E+02 Kg 1,4-DCB eq
- PET: 1.16 E+02 Kg 1,4-DCB eq
- PP: 6.24 E+00 Kg 1,4-DCB eq
- Productos metálicos: 2.73 E+01 Kg 1,4-DCB eq
- Papel: 1.39 E+01 Kg 1,4-DCB eq

Los resultados de la caracterización referentes al impacto en la toxicidad humana por componente se presentan en la Figura 48.

Figura 48 CML 2001-Toxicidad humana (Kg 1,4-DCB eq)



Fuente: López T, 2018

## 7.2.4 Uso del suelo

El resultado de la caracterización realizada en el año 2017: 7.82 E+01 m<sup>2</sup>a.

El resultado de la operación, construcción de celdas y mantenimiento género en el año 2017: 7.80 E+03 m<sup>2</sup>a.

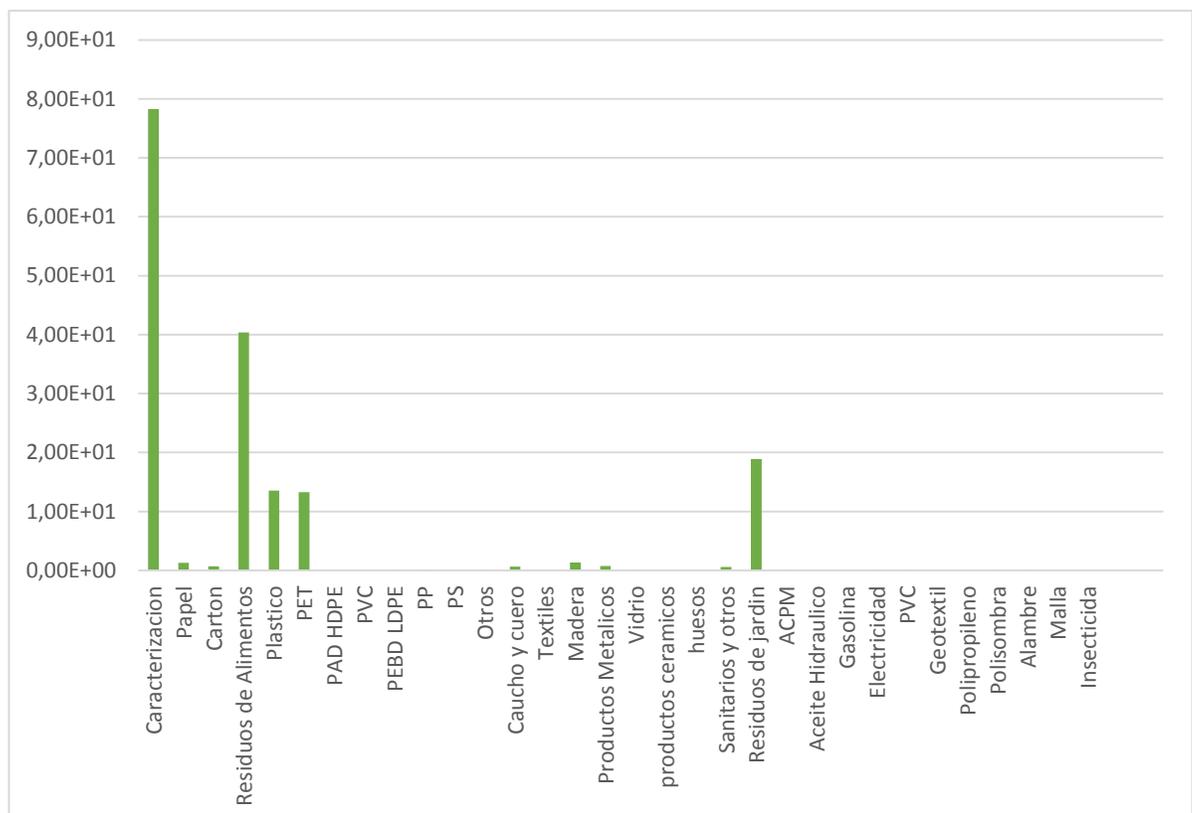
Los elementos de mayor Impacto GWP en el uso del suelo en unidades de m<sup>2</sup>a por componente son:

- Residuos de alimentos: 4.04 E+01 m<sup>2</sup>a
- Residuos de jardín: 1.89 E+01 m<sup>2</sup>a
- Plástico: 1.36 E +01 m<sup>2</sup>a
- PET: 1.33 E+01 m<sup>2</sup>a
- Papel: 1.26 E+00 m<sup>2</sup>a
- Cartón: 6.69 E-01 m<sup>2</sup>a
- Madera: 1.34 E+00 m<sup>2</sup>a
- Productos metálicos: 7.64 E-01 m<sup>2</sup>a
- Sanitarios y otros: 5.69 E -01 m<sup>2</sup>a

Los resultados de la caracterización referentes al impacto en el uso del suelo por componente se presentan en la Figura 49.

**Fuente:** López T, 2018

**Figura 49** CML 2001-Uso del suelo (m<sup>2</sup>a)



## 7.2.5 Ecotoxicidad Terrestre

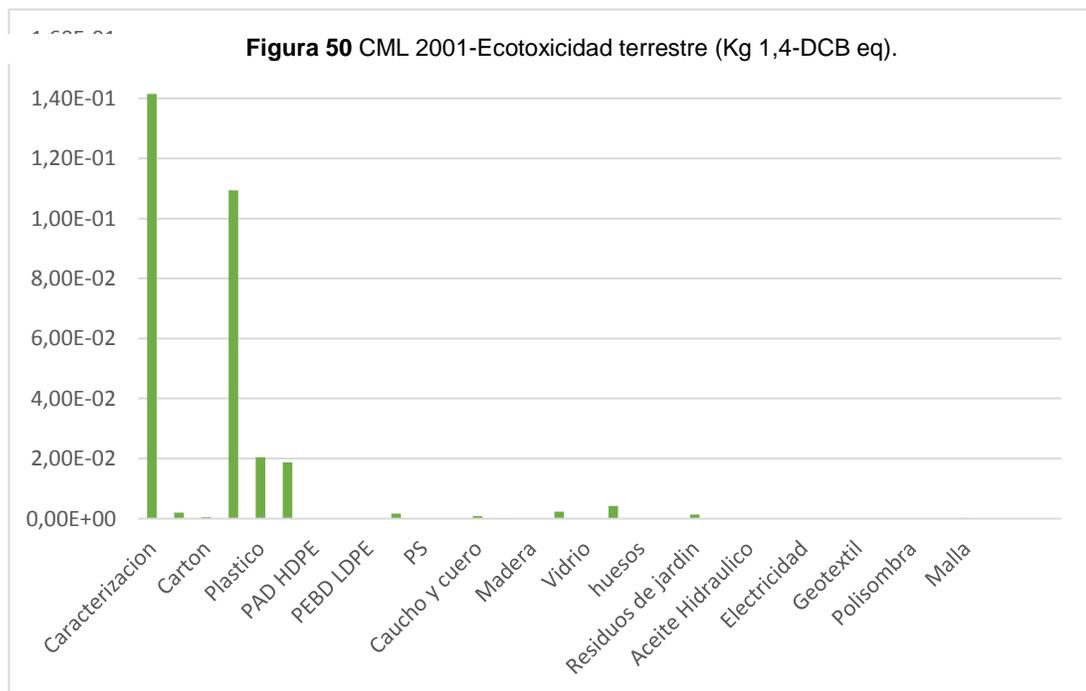
El resultado de la caracterización realizada en el año 2017: 1.42 E-01 Kg 1,4-DCB eq.

El resultado de la operación, construcción de celdas y mantenimiento género en el año 2017: 2.58 E+07 Kg 1,4-DCB eq.

Los elementos de mayor Impacto GWP en la Ecotoxicidad terrestre en unidades de Kg 1,4-DCB eq. por componente son:

- Residuos de alimentos: 1.09 E-01
- Plástico: 2.05 E -02
- PET: 1.87 E-02
- Productos cerámicos: 4.23 E-03
- Papel: 1.49 E -03
- Residuos de Jardín: 1.38 E -03
- Cartón: 5.40 E-04

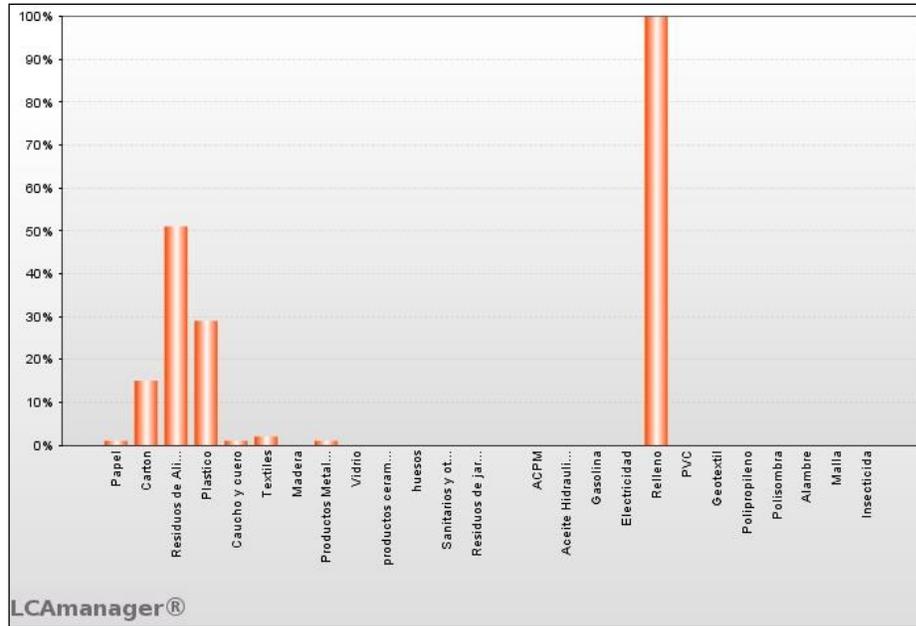
Los resultados de la caracterización referentes al impacto en la Ecotoxicidad terrestre por componente se presentan en la Figura 50.



Fuente: López T, 2018

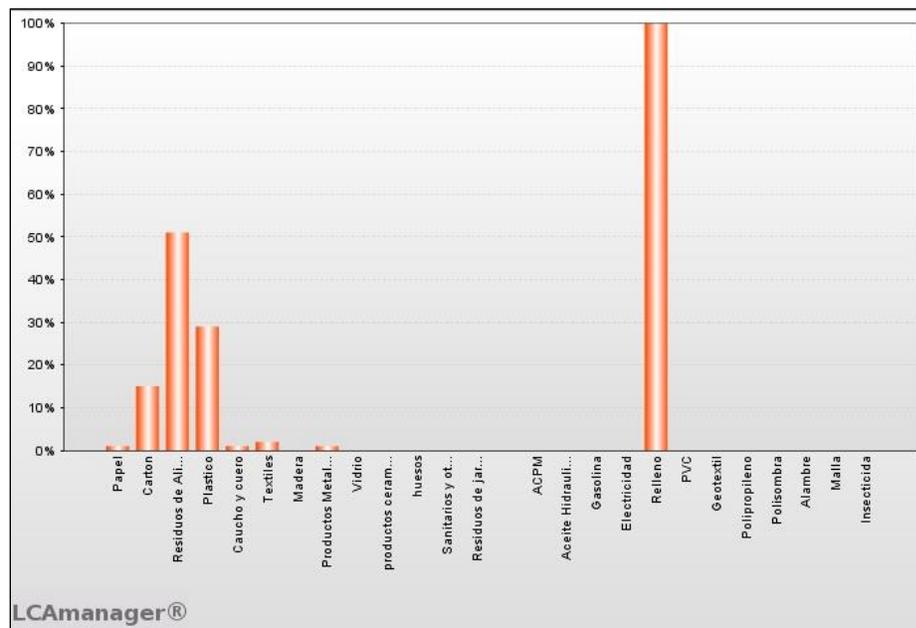
### 7.3 Calentamiento Global IPCC

Figura 51 CML 2001-Calentamiento global (Kg CO<sub>2</sub> eq.)



Fuente: López T, 2018

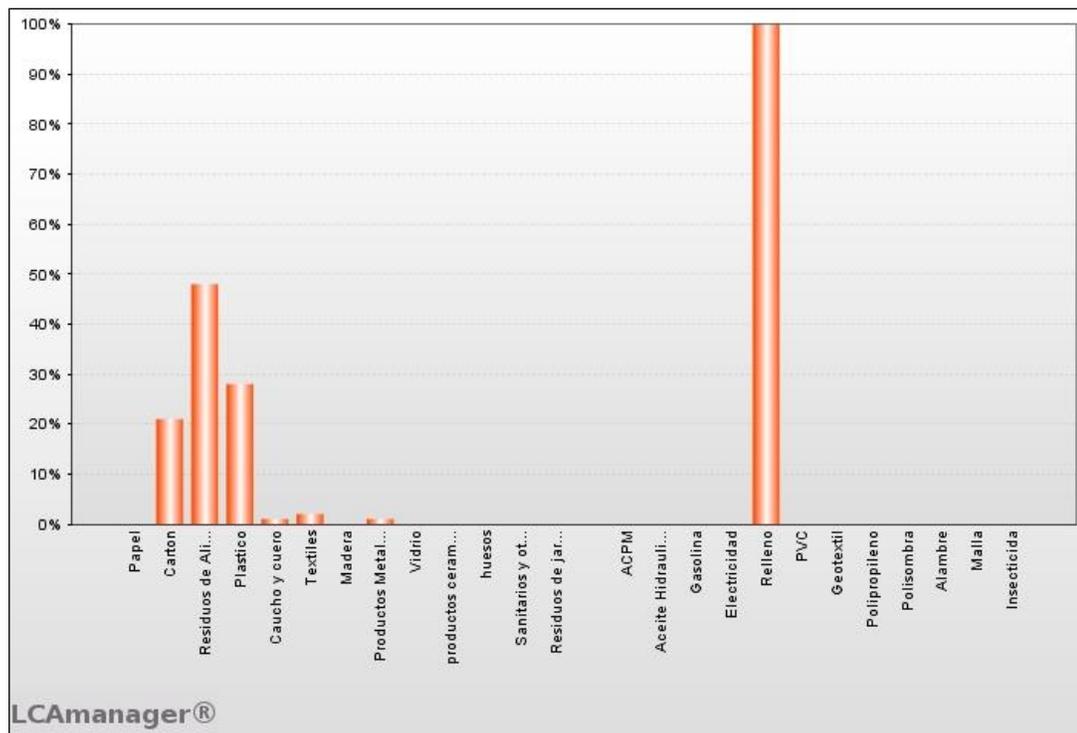
Figura 52 IPCC 2007-Calentamiento global (Kg CO<sub>2</sub> eq.)



Fuente: López T, 2018

En las Figuras 51 y 52 se observa que el grado de contaminación en unidades Kg de CO<sub>2</sub> equivalente que influye en el calentamiento global son similares para la metodología CML 2001 e IPCC 2007, identificando que los residuos de alimentos influyen en el 50% de este grado de contaminación. En consecuencia, estos residuos orgánicos generados por las actividades diarias de los hogares del municipio representan gran impacto al medio ambiente. Por otra parte, el plástico y el cartón representan respectivamente el 29% y el 15% del impacto sobre el calentamiento global, expresado en unidades de Kg de CO<sub>2</sub> eq.

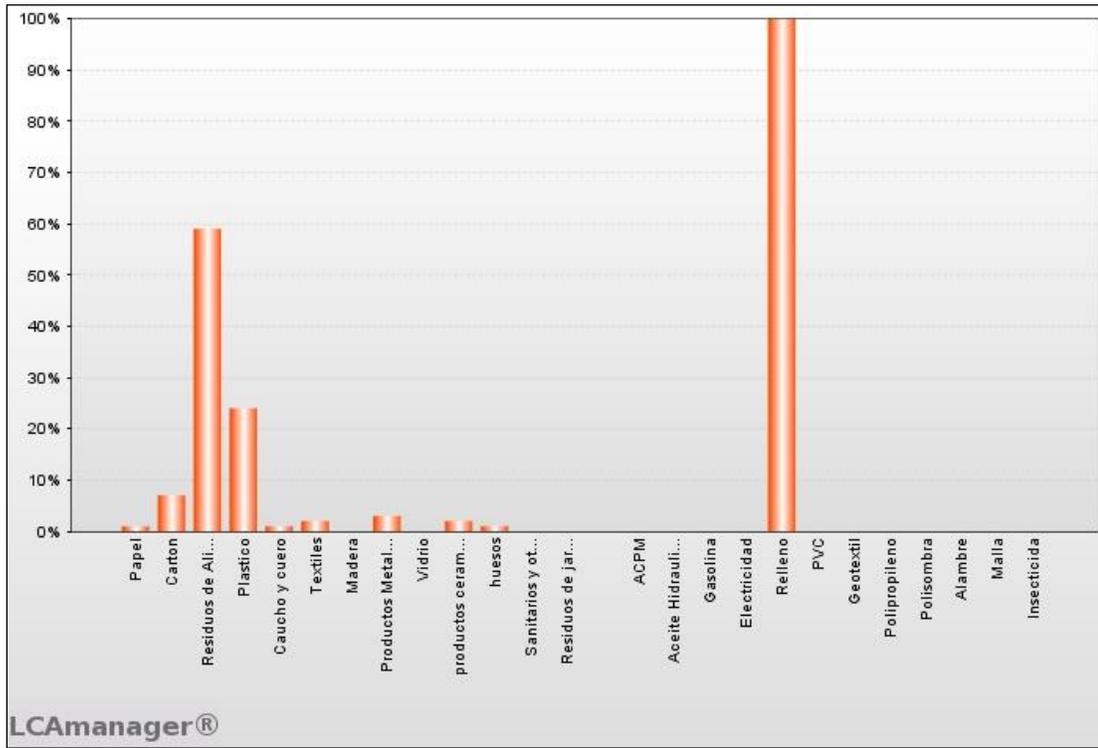
**Figura 53** IPCC 2013-Calentamiento global (Kg CO<sub>2</sub> eq.)



Fuente: López T, 2018

A diferencia de las anteriores metodologías aplicadas (CML 2001 e IPCC 2007), la metodología IPCC 2013 presenta variación en los porcentajes del impacto sobre el calentamiento global en los principales componentes de la caracterización correspondientes a residuos de alimentos, plástico y cartón representando el 47%, 28% y 21% respectivamente. Además, disminuye a 0% el impacto del papel sobre el calentamiento global. (Ver Figura 53).

Figura 54 CML 2001-Eutrofizacion (Kg PO<sub>4</sub> eq)

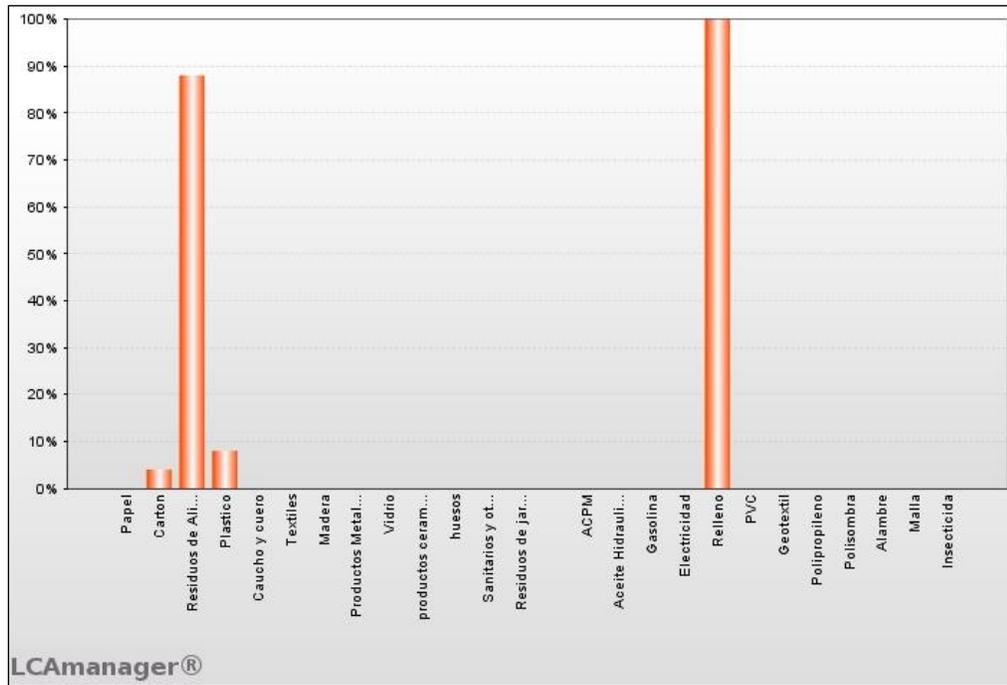


Fuente: López T, 2018

En la Figura 54 se observa el impacto sobre la eutrofización que tienen los componentes de la caracterización de residuos sólidos. Los residuos de alimentos representan el 59% expresado en unidades de Kg de PO<sub>4</sub> equivalente. De igual forma como se apreció en los impactos sobre el calentamiento global, el plástico y el cartón generan en menor proporción impactos sobre la eutrofización en comparación con los residuos de alimentos. El vidrio y la madera no representan impacto a la eutrofización.

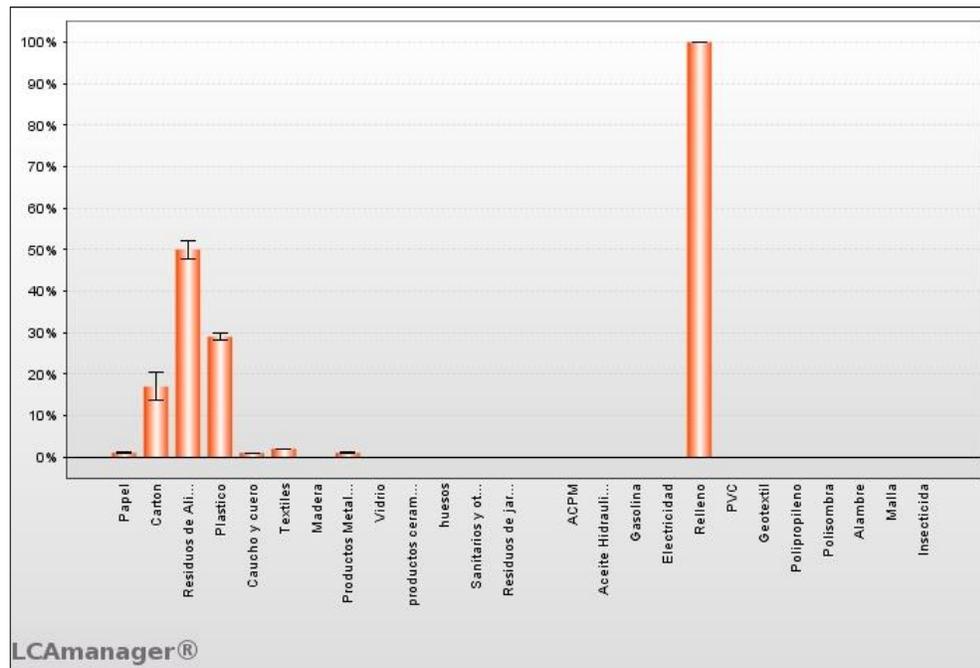
Los impactos generados por los componentes de la caracterización de residuos sólidos sobre la oxidación fotoquímica se representan en la Figura 55. Según se observa, los componentes de residuos de alimentos, plástico y cartón son los responsables de esta contaminación. El principal contribuyente son los residuos de alimentos que alcanzan un 88% en unidades de Kg de etileno equivalente, a diferencia de los otros dos componentes que son inferiores al 10%. Cabe resaltar que los demás componentes de la caracterización no influyen en la oxidación fotoquímica.

**Figura 56** CML 2001-Oxidacion fotoquímica (Kg etileno eq.)



**Fuente:** López T, 2018

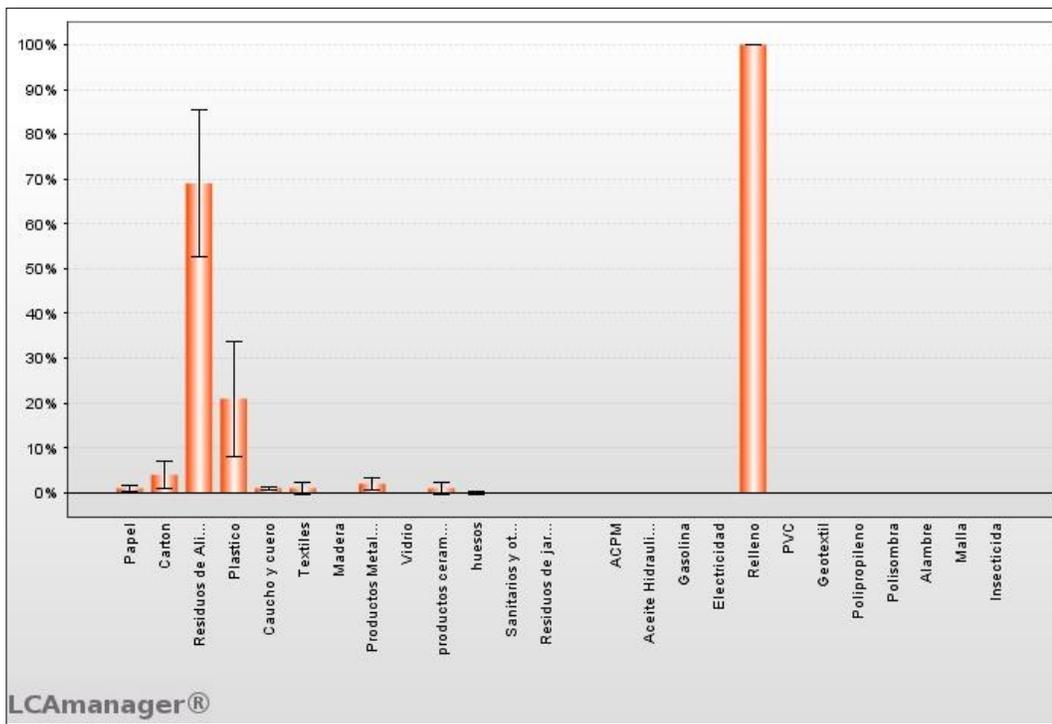
**Figura 55** Perfil ambiental de comparación de metodologías CML 2001-IPCC 2007-IPCC 2013



**Fuente:** López T, 2018

Las metodologías CML 2001, IPCC 2007 e IPCC 2013 establecen que el mayor componente que impacta en el calentamiento global en unidades de Kg de CO<sub>2</sub> equivalente son los residuos de alimentos debido a que su proceso de descomposición o degradación es más rápido a diferencia de los otros componentes. (Ver Figura 56). El plástico y el cartón representan el 30% y el 17% respectivamente en el impacto en el calentamiento global y en menor proporción los componentes papel, caucho y cuero, textiles y productos metálicos. Por otra parte, los componentes restantes no influyen en este impacto.

**Figura 57** Perfil ambiental de los impactos generados por los residuos sólidos.



Fuente: López T, 2018

Los residuos de alimentos generan el mayor impacto sobre el medio ambiente de acuerdo a los resultados obtenidos en el software LCA manager. (Figura 57). Esto indica que este componente es el principal influyente con 70% en el calentamiento global en unidades de Kg de CO<sub>2</sub> eq., eutrofización en unidades de Kg de PO<sub>4</sub> eq. y oxidación fotoquímica en unidades de Kg de etileno eq. Por otra parte, el plástico es el segundo componente que representa mayor impacto con un porcentaje de 21. Los demás componentes no son significantes sobre estos impactos.

## 8. CAPITULO IV. EVALUACIÓN DE CO<sub>2</sub>.

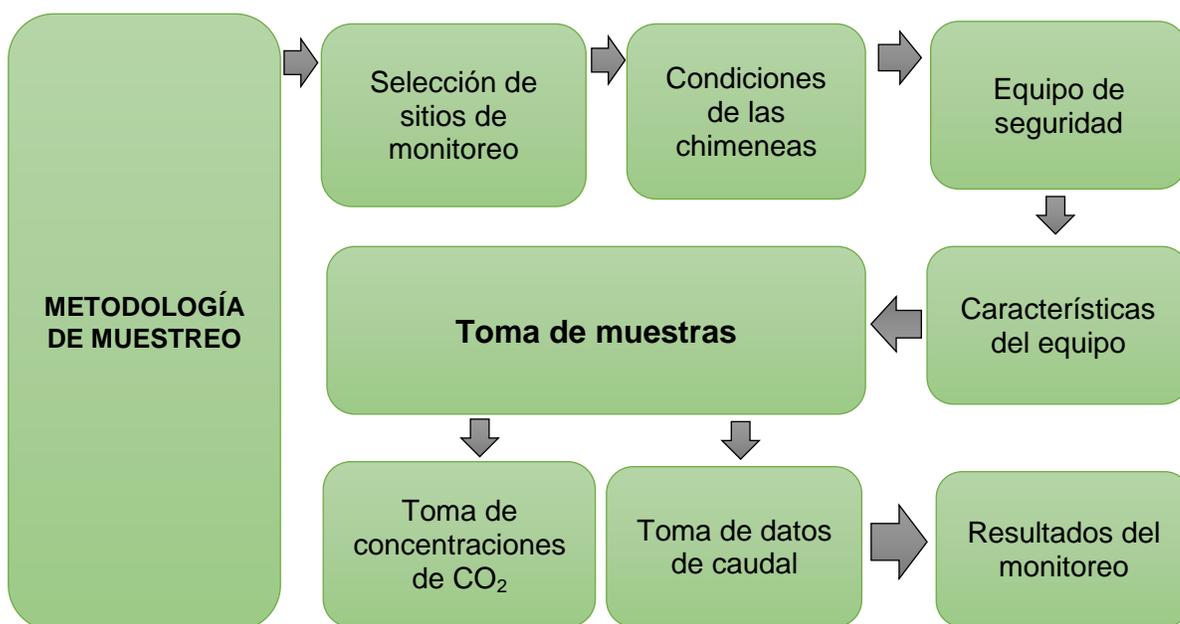
Como parte de la determinación de los impactos causados por la operación del relleno sanitario regional La Cortada se hace necesario realizar un monitoreo de gases efecto invernadero producidos en el relleno sanitario con el fin de realizar la respectiva correlación con los datos arrojados por el trabajo en el análisis del ciclo de vida. A continuación, se describe metodológicamente el procedimiento efectuado para realizar el respectivo monitoreo, las herramientas y equipos usados.

Además, se expresa de manera clara los aspectos a tener en cuenta para la realización de un correcto monitoreo de gases; en cada uno de estos se aclara cuales aspectos se usaron en el presente monitoreo y cuáles no fueron posibles por inconvenientes en recursos, falta de información y equipos adecuados para la toma de muestra.

### 8.1 Metodología de muestreo

En la Figura 58 se presenta la metodología general para el muestreo de CO<sub>2</sub> en el relleno sanitario regional “La Cortada”.

Figura 58 Metodología general para la evaluación de CO<sub>2</sub>



Fuente: López T, 2018

### 8.1.1 Selección de sitios de monitoreo

La selección del sitio de monitoreo es importante y requiere la ubicación más representativa para monitorear las condiciones de la calidad del aire. Esta selección puede realizarse de acuerdo a la siguiente secuencia:

Dadas las características del monitoreo se define el propósito como determinación de la cantidad de emisión de gases efecto invernadero en intervalos de tiempo muestreando a partir de la medición de CO<sub>2</sub> in situ.

Para la ubicación de los sitios de muestreo se tiene claro que es la toma de caudales y concentraciones de CO<sub>2</sub> por lo que esta toma debe hacerse exclusivamente en las chimeneas diseñadas para tal fin en el relleno sanitario.

Estas chimeneas se encuentran referenciadas a continuación en la Tabla 11.

**Tabla 11** Ubicación de las chimeneas

Chimenea	Referencia	
	N	W
# 1	7°21'7.58"	72°37'38.98"
#2	7°22'8.42"	72°37'38.41"
#3	7°22'6.76"	72°37'38.05"
#4	7°22'7.04"	72°37'35.73"
#5	7°22'5.21"	72°37'35.73"
#6	7°22'8.73"	72°37'37.29"
#7	7°22'15.33"	72°37'40"
#8	7°22'19.31"	72°37'40.84"
#9	7°22'18.91"	72°37'39.64"

**Fuente:** López T, 2018

En total se seleccionaron 9 sitios de muestreo, teniendo en cuenta las siguientes características:

- Chimeneas ubicadas en la celda en funcionamiento y por su gran producción de gas pues es allí donde se disponen los residuos y las cantidades actuales determinadas en la caracterización física de residuos.
- Chimeneas ubicadas en zonas clausuradas para determinar su producción actual de gases y la correlación con la celda en funcionamiento.

Para este caso no se tuvieron en cuenta otros aspectos en la determinación de los puntos de muestreo como el inventario de emisiones, pues no se cuenta con información al respecto. Por otro lado, tampoco se tiene un tren de monitoreo de calidad del aire dispuesto por la empresa y por consiguiente un modelo de

dispersión de contaminantes, teniendo en cuenta que estos modelos requieren de datos meteorológicos, condiciones atmosféricas y datos de topografía del lugar.

### 8.1.2 Equipo de seguridad

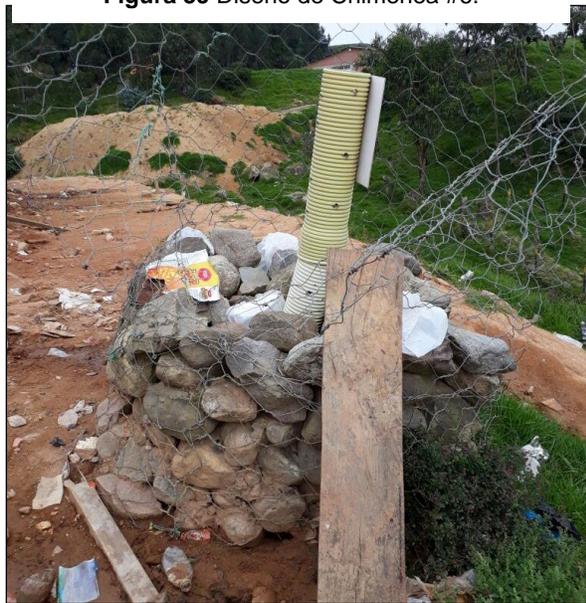
El equipo de seguridad para la realización del muestro se compone por dos personas que tomaron y sistematizaron los datos con la debida protección, compuesta por guantes y tapabocas, debido al constante contacto con el gas producido por las chimeneas.

### 8.1.3 Condiciones de las Chimeneas

El diseño de las chimeneas de extracción de gases en el relleno sanitario está compuesto por una tubería de 6 pulgadas perforada y sostenida a través de un enrocado en gavión como se observa en la Figura 59.

Algunas chimeneas se encuentran en mal estado debido al tiempo de su instalación y al depósito de materiales y residuos a su alrededor que impiden el paso para la toma de muestra y a su vez posibilitan el escape de gases al momento de la toma de datos de caudal, lo que puede convertirse en un error en la toma de datos debido a la falta de recursos para hacer el adecuado taponamiento de los sitios. Las condiciones de estas chimeneas se muestran en la Figura 60.

**Figura 59** Diseño de Chimenea #6.



**Fuente:** López T, 2018

Por otra parte, se desconoce la profundidad a la cual se encuentran instaladas cada una de las chimeneas dado que la empresa operadora del relleno no dispuso de los datos para el conocimiento previo al monitoreo.

**Figura 60** Residuos alrededor de la Chimenea #2



Fuente: López T, 2018

#### **8.1.4 Características del equipo**

La correcta toma de muestras para determinar las cantidades de gases efecto invernadero producidos en el relleno sanitario se realiza a través de algunas metodologías y equipos específicos para la medición de concentraciones en fuentes fijas como chimeneas, estos equipos tales como muestreadores isocinéticos y sensores dragger son costosos en su adquisición y uso por lo que para efectos de este análisis se limita en el uso del equipo correcto para la medición, pues estos equipos tienen un principio de medición específico que permite claridad y confianza en la determinación de las sustancias y concentraciones que se deseen medir.

Para este muestreo se usó un medidor de CO<sub>2</sub> con sensores para medición de Humedad relativa y temperatura, cuyo modelo y nombre se referencia en la Tabla 12.

**Tabla 12** Descripción del equipo de muestreo.

<b>Marca</b>	Lutron
<b>Modelo</b>	GCH-2018
<b>Medida</b>	Dióxido de carbono, humedad, temperatura, punto de rocío.
<b>Rango de CO<sub>2</sub></b>	0 a 4000 ppm X 1 ppm
<b>Rango de humedad</b>	10 a 95% humedad relativa
<b>Rango de temperatura</b>	0 a 50 °C

**Fuente:** Vía industrial, 2017.

La referencia del equipo aclara que se usa exclusivamente para medición en ambientes y no directamente en chimeneas, lo que para efectos de la confiabilidad de los datos tomados puede ser un problema. Por otro lado, los rangos que aclara el manual de uso del equipo especifica de 0 a 4000 ppm. Sin embargo, se registraron lecturas más altas de este rango en las chimeneas por lo que puede haber un error de equipo en la toma de muestras señalada. El equipo empleado se muestra en la Figura 61.

**Figura 61** Medidor de CO<sub>2</sub>



**Fuente:** Lutron Electronic, 2017.

### 8.1.5 Toma de muestras

La toma de muestra se realizó durante un total de 7 días con 3 muestreos por día, la finalidad de este programa fue determinar el comportamiento de producción de gas en el relleno durante una semana de funcionamiento y también durante un día, teniendo en cuenta que según la literatura, factores como la temperatura, y la precipitación aumentan o disminuyen la producción, considerándose así que durante una semana se permitiría analizar el comportamiento sin posibilidad de extenderlo debido a las limitaciones en recursos y tiempo para realizar en otros lapsos y duraciones.

#### 8.1.5.1 Toma de concentraciones de CO<sub>2</sub>

Para el muestreo se calcula la toma de 567 datos, alrededor de 3 datos por chimenea que luego fueron promediados, así mismo se toman datos de humedad y temperatura la toma se realiza a través de la exposición del sensor en la boca de la chimenea hasta que este establezca la actualización de lecturas como se muestra en la Figura 62.

**Figura 62** Toma de concentraciones de CO<sub>2</sub>



**Fuente:** López T, 2018

### 8.1.5.2 Toma de datos de caudal

Para la toma de datos de caudal, a falta de equipos y herramientas específicas para el tema se realizó a través de una bolsa plástica a la cual se le determino el volumen previamente, la medición se realiza a través del llenado de la bolsa (Figuras 63 y 64) con medición de tiempo para después determinar el volumen recogido y realizar el cálculo del caudal, esta medición se realizó una vez por chimenea.

**Figura 63** Toma de caudal



Fuente: López T,

2018

**Figura 64** Llenado de la bolsa



Fuente: López T, 2018

## 8.2 Resultados del monitoreo

Los resultados obtenidos se sistematizaron en tablas de Excel para realizar el manejo y cálculo de las concentraciones y producción de cantidades de gas deseadas, estos cálculos se realizaron para la producción por segundo y su estimación también para lapsos de minutos y horas. (Anexo C).

En las Tablas 13, 14 y 15 se muestra el formato de sistematización de datos en cada muestreo, para el día lunes.

**Tabla 13** Resultados del muestreo día lunes 8:00 am

<b>Horas</b>	<b>8:00 a.m.</b>			
<b>Puntos/Días</b>	<b>[CO<sub>2</sub>] (ppm)</b>	<b>Carga [CO<sub>2</sub>] (Kg/día)</b>	<b>Q (l/s)</b>	<b>T (°C)</b>
1	6664,67	0,1519	3,60	32
2	4582,00	0,0841	2,90	32
3	5439,33	0,0723	2,10	32
4	6356,67	0,1006	2,50	32
5	2696,00	0,0034	0,20	32
6	3359,67	0,0081	0,38	32
7	2651,00	0,0002	0,01	24
8	7072,33	0,0005	0,01	24
9	3300,33	0,0002	0,01	24

Fuente: López T, 2018

**Tabla 14** Resultados del muestreo día lunes 1:00 pm

<b>Horas</b>	<b>1:00 p.m.</b>			
<b>Puntos/Días</b>	<b>[CO<sub>2</sub>] (ppm)</b>	<b>Carga [CO<sub>2</sub>] (Kg/día)</b>	<b>Q (l/s)</b>	<b>T (°C)</b>
1	6799.00	0.1549	3.60	32
2	6921.00	0.1271	2.90	32
3	4543.33	0.0604	2.10	32
4	6386.33	0.1011	2.50	32
5	3979.67	0.0058	0.23	32
6	4193.67	0.0095	0.36	32
7	1956.00	0.0001	0.01	24
8	628.33	0.0000	0.01	24
9	2497.33	0.0002	0.01	24

Fuente: López T, 2018

**Tabla 15** Resultados del muestreo día lunes 3:00 pm

<b>Horas</b>	<b>3:00 p. m.</b>			
<b>Puntos/Días</b>	<b>[CO<sub>2</sub>] (ppm)</b>	<b>Carga [CO<sub>2</sub>] (Kg/día)</b>	<b>Q (l/s)</b>	<b>T (°C)</b>
<b>1</b>	4443.33	0.0928	3.30	32
<b>2</b>	6103.00	0.1082	2.80	32
<b>3</b>	5412.67	0.0754	2.20	32
<b>4</b>	4966.33	0.0692	2.20	32
<b>5</b>	3104.33	0.0038	0.19	32
<b>6</b>	4420.33	0.0093	0.33	32
<b>7</b>	2619.00	0.0002	0.01	24
<b>8</b>	770.33	0.0001	0.01	24
<b>9</b>	3825.00	0.0002	0.01	24

**Fuente:** López T, 2018

Como se observa en las Tablas anteriores, se tomaron los promedios de los 3 datos de concentración obtenidos en el muestro y a su vez se sistematizaron los datos de temperatura, caudal, y humedad.

En cuanto a las humedades y temperaturas obtenidas, según los datos obtenidos se infiere que no cambia en gran medida al mantenerse alrededor de 95% y la temperatura alrededor de 32°C, esta humedad es explicada por el contenido de agua existente en los residuos al momento de su descomposición, a su vez a temperatura tiene este valor debido al calor generado por la descomposición aerobia de los residuos dispuestos, por lo que se mantiene constante y eso se ve reflejado en los datos obtenidos.

Además, se realizó el cálculo o paso de unidades de ppm a gramos por litro, a través de la ecuación 4, en donde se tiene en cuenta la masa molar de CO<sub>2</sub> así como el volumen calculado a unas condiciones de temperatura y presión de las cuales se obtuvo el dato de la temperatura y se asume la presión a 1 atm debido a la falta de equipos para la medición de esta al momento de la toma de caudales. Sin embargo, así se realiza el cálculo para obtener los datos de concentración. Con la formula expresada se obtiene la concentración en miligramos por metro cubico, por lo que se hace necesario realizar el cálculo para llegar a obtener las cantidades de producción de dióxido de carbono en gramos por segundo.

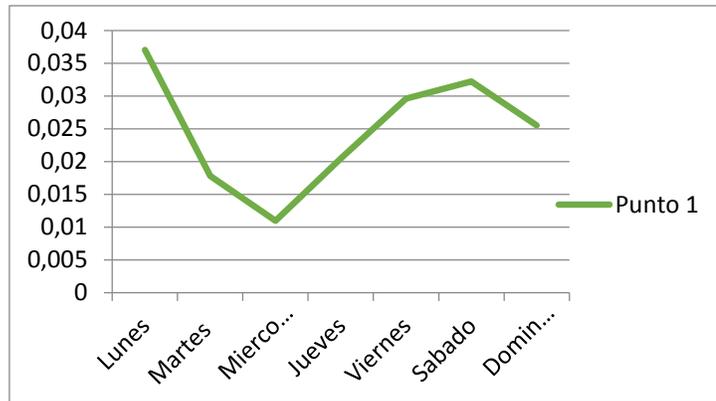
$$N \text{ ppm} \times \frac{M}{V_{(atm, T^a)}} = \text{mg/m}^3 \quad \text{Ec}$$

**(4)**

La ecuación anterior se usa debido a las condiciones de temperatura y presión en las que puede estar el gas para determinar en lo posible la verdadera cantidad de dióxido de carbono que se está produciendo, evitando así de cierta manera el porcentaje de error determinado por las limitaciones antes mencionadas.

En las siguientes figuras se observa el comportamiento a lo largo de toda la semana de la producción en cada punto muestreado.

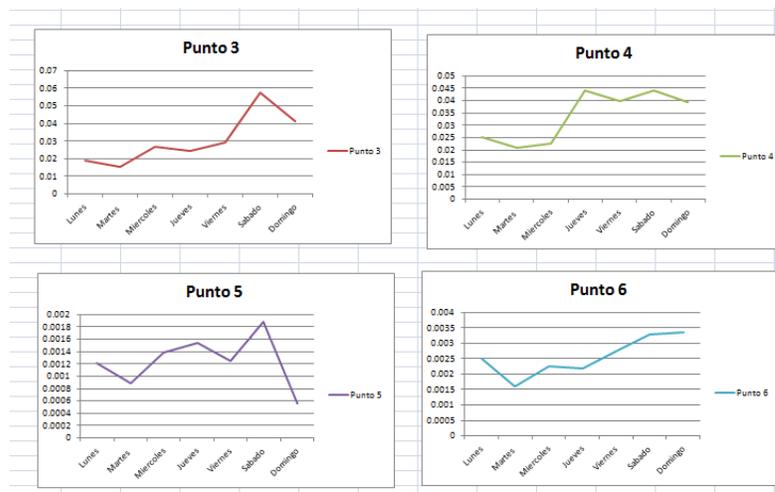
**Figura 65** Comportamiento de la producción semana en el punto 1.



Fuente: López T, 2018.

De acuerdo a lo observado en las Figuras 65 y 66 y según el comportamiento de la producción de CO<sub>2</sub>, los puntos 1, 3, 4, 5 y 6 presentan los picos más altos de producción de gas el día sábado, pues están ubicados en la celda activa del relleno, justificando su alta producción.

**Figura 66** Comportamiento de la producción semanal en los puntos 3, 4, 5 y 6

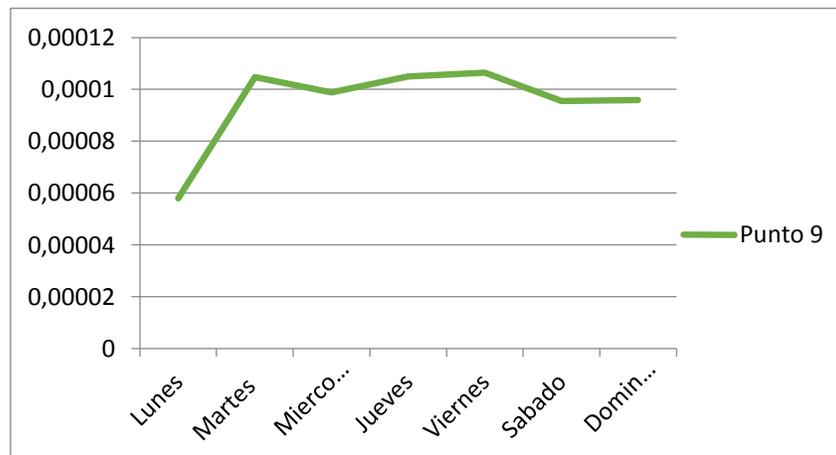


Fuente: López T, 2018.

Por otro lado, el mal diseño y disposición de las chimeneas no permite una medición más precisa en la toma de datos sobre producción de gas, es así como en los puntos muestreados ubicados en una celda clausurada, los valores de CO<sub>2</sub> obtenidos en algunos casos igualan a las mediciones tomadas en la celda en funcionamiento lo que podría traducirse en un error de equipo puesto que en este caso la medición de gas metano debe haber aumentado con respecto a la producción de dióxido de carbono.

En la Figura 67, se presenta el comportamiento de los datos tomados en el punto 9. En la producción semanal de CO<sub>2</sub> en este punto se presentan concentraciones iguales a lecturas obtenidas en el punto 1, ubicado en la celda activa del relleno.

**Figura 67** Comportamiento de la producción semana en el punto 9.



**Fuente:** López T, 2018.

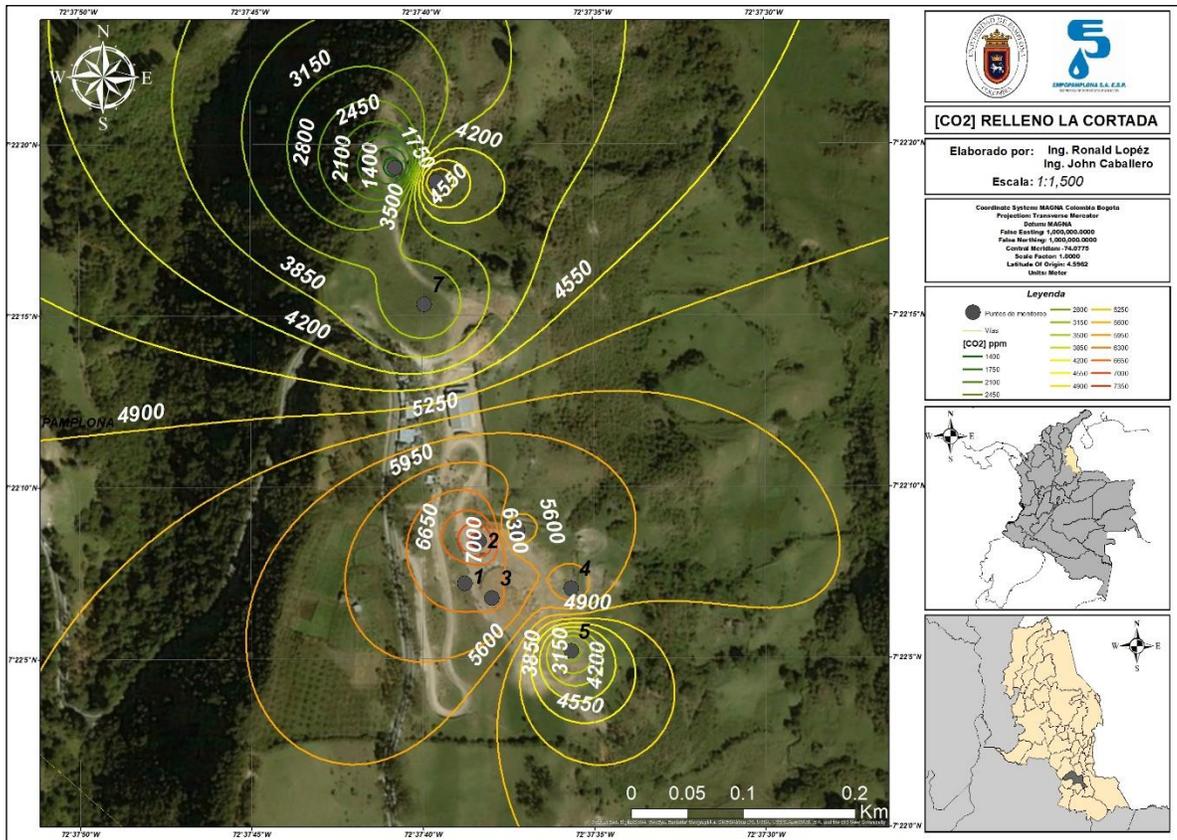
Es necesario establecer una confianza en los datos a partir de la estimación de la producción de gas metano (CH<sub>4</sub>); no se podría calcular teniendo en cuenta los porcentajes encontrados en la literatura pues las condiciones de temperatura y operación del relleno sanitario no son las mismas, por lo que dicho porcentaje no se podría calcular con un nivel de confianza alto.

### **8.2.1 Análisis espacial del monitoreo de CO<sub>2</sub>**

Se tomaron los datos del monitoreo de CO<sub>2</sub> y temperatura, y los valores correspondientes a la carga contaminante y se elaboraron mapas de concentración, para el análisis espacial del monitoreo realizado en los 9 puntos seleccionados en el relleno sanitario regional "La Cortada".

En la Figura 68 se presenta el mapa referente al comportamiento del CO<sub>2</sub> registrado durante el periodo de muestreo (1 semana).

Figura 68 Concentraciones de CO<sub>2</sub> diario

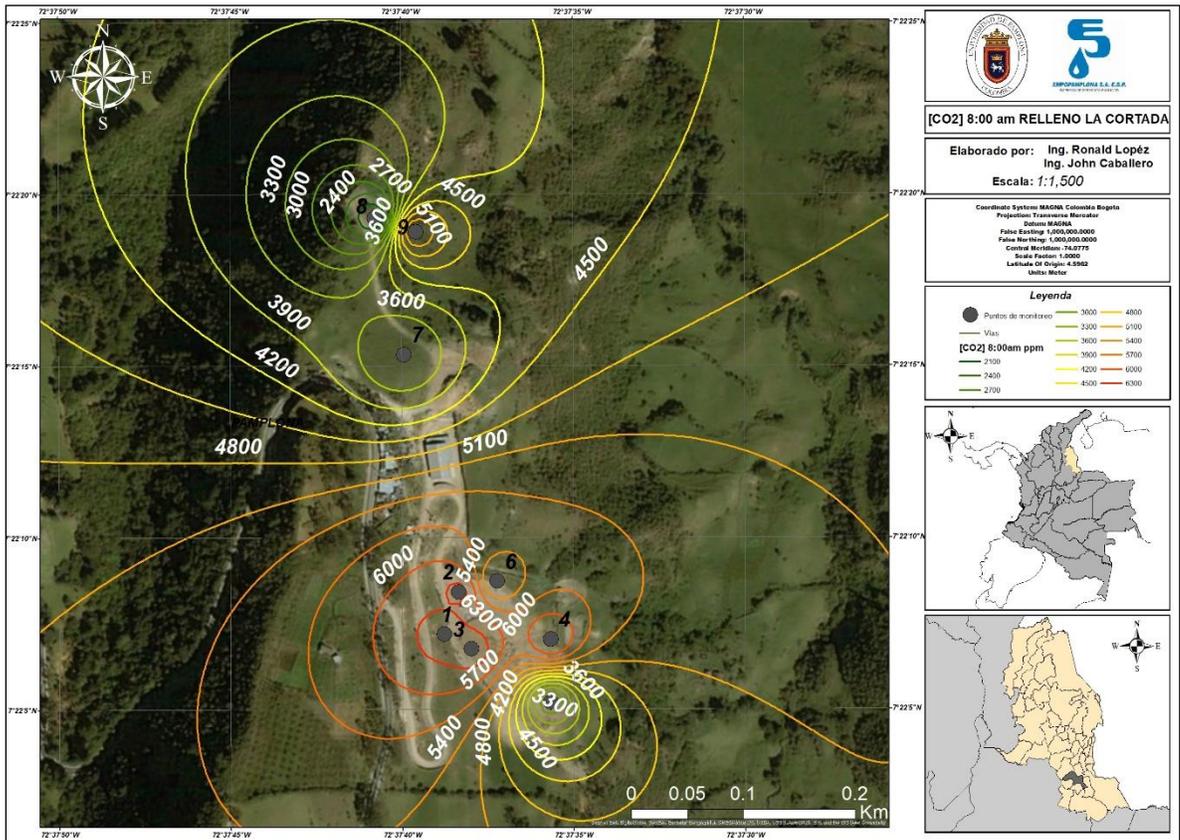


Fuente: López T, 2018

Como se observa en el Figura 68, las máximas concentraciones de CO<sub>2</sub> se presentan en los puntos 1 y 2 con valores superiores a los 6500 ppm (datos por encima del umbral de medición del equipo), debido al tiempo de disposición de los residuos en la celda; lo que indica que los residuos en la zona de las chimeneas 1 y 2 se encuentran entre la fase III y IV de generación de gases en el relleno sanitario. Por otro lado, en los puntos 7, 8 y 9 se presentan bajas concentraciones de CO<sub>2</sub>, puesto que, en esta área del relleno, las celdas han sido clausuradas, al igual que en los puntos ubicados en las chimeneas 4 y 6. El punto 5 se encuentra ubicado en cercanías a la chimenea 3, sitios donde actualmente se lleva a cabo el proceso de disposición final de los residuos.

En la Figura 69 se presenta el mapa referente al comportamiento del CO<sub>2</sub> registrado a las 8:00 am, durante el periodo de muestreo (1 semana).

Figura 69 Concentraciones de CO<sub>2</sub> monitoreo 8:00 am

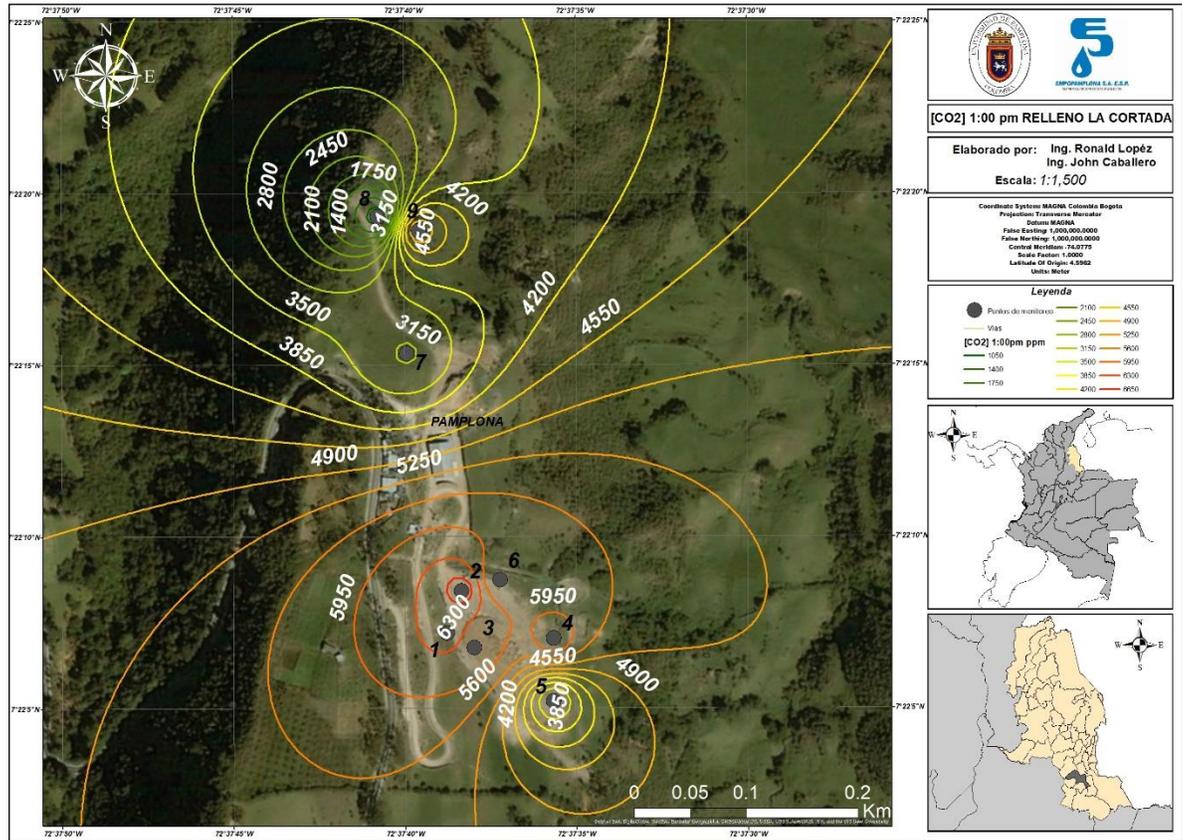


Fuente: López T, 2018

En este caso, se observa la tendencia de presentarse las mayores concentraciones de CO<sub>2</sub> en los puntos 1 y 2, debido al tiempo de disposición de los residuos sólidos en las celdas y la etapa de generación de gas en la que se encuentran (etapa III). De otro modo, en los puntos más alejados (chimeneas 7, 8 y 9) se presentan los valores más bajos de CO<sub>2</sub>, en comparación con los otros puntos de monitoreo, de acuerdo al tiempo de disposición de los residuos y al funcionamiento de las celdas. En los puntos 3 y 5 se presentan concentraciones relativamente altas, teniendo en cuenta la hora del monitoreo, la funcionalidad de la celda (trabajo activo de relleno de la celda) y el tiempo que llevan los residuos sólidos depositados para la generación de gases (etapas I y II).

En la Figura 70 se presenta el mapa referente al comportamiento del CO<sub>2</sub> registrado a la 1:00 pm, durante el periodo de muestreo (1 semana).

Figura 70 Concentraciones de CO<sub>2</sub> monitoreo 1:00 pm

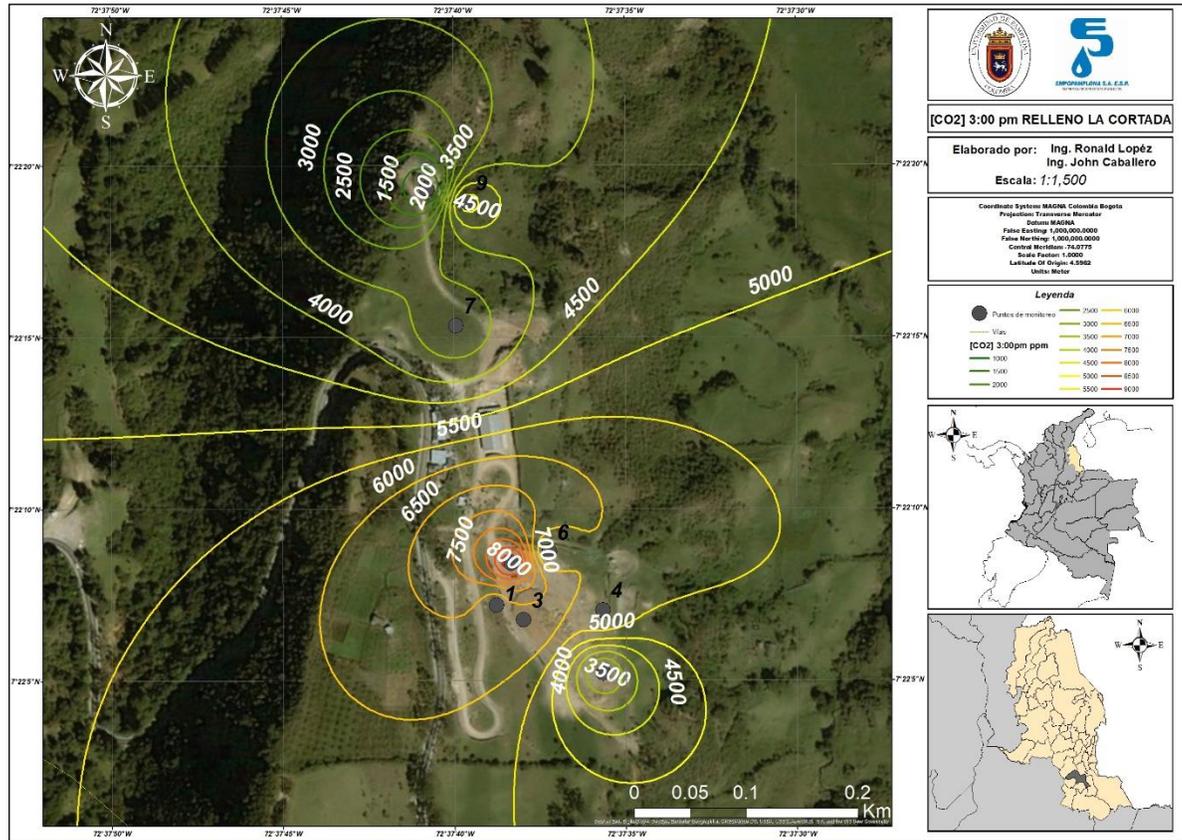


Fuente: López T, 2018

Para el monitoreo de la 1:00 de la tarde se presentaron concentraciones altas en los puntos 1 y 2 y concentraciones bajas en los puntos 7, 8 y 9. Las concentraciones intermedias se presentaron en los puntos 3 y 5. Sin embargo, las concentraciones registradas a la 1:00 pm durante el periodo de muestreo son más bajas que las registradas en el monitoreo de las 8:00 am y las 3:00 pm. Lo anterior se puede deber a la variación en horarios de recolección, transporte y recepción de los residuos en el relleno sanitario, pues las rutas en el municipio de Pamplona y la provincia varían y, por ende, se cumplen distintos horarios para el proceso de traslado y compactación de los residuos sólidos, lo que puede influir en el tiempo de generación de los gases como CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>.

En la Figura 71 se presenta el mapa referente al comportamiento del CO<sub>2</sub> registrado a las 3:00 pm, durante el periodo de muestreo (1 semana).

Figura 71 Concentraciones de CO<sub>2</sub> monitoreo 3:00 pm

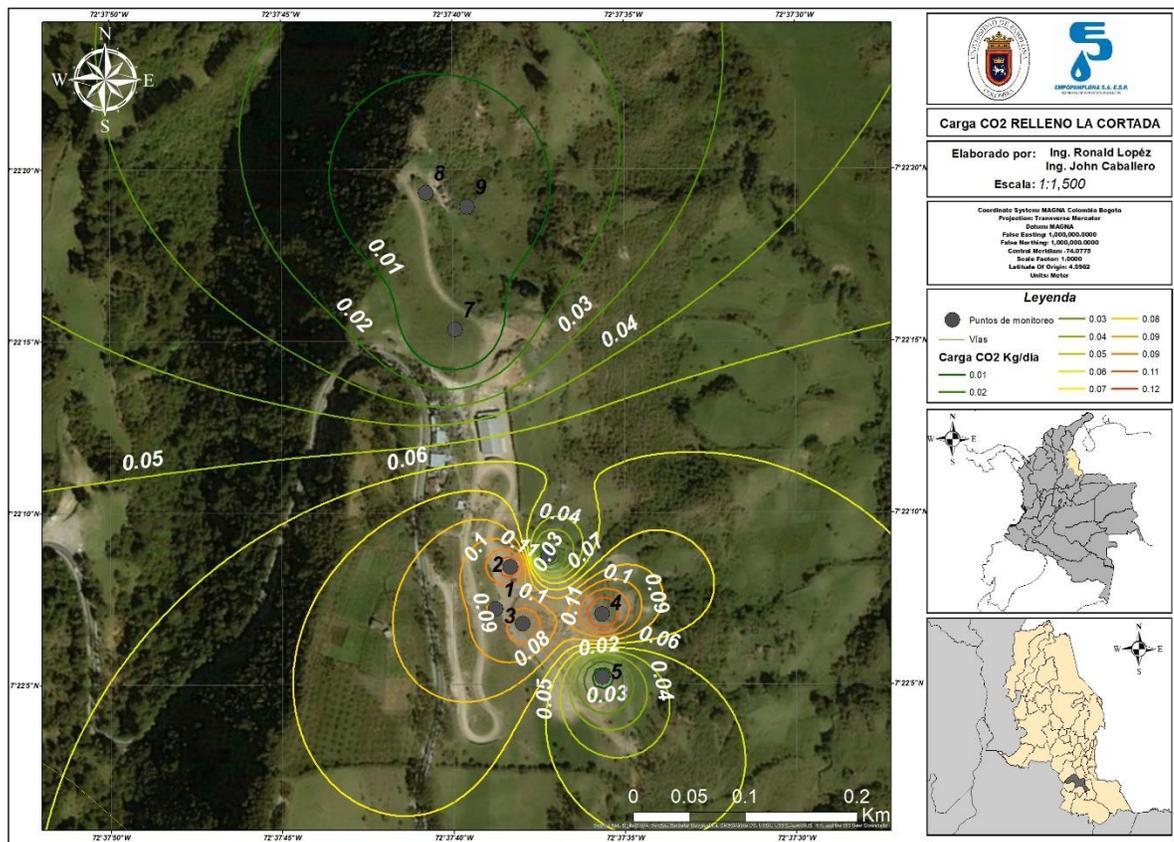


Fuente: López T, 2018

El análisis espacial del monitoreo de CO<sub>2</sub> a las 3 de la tarde arrojó que las mayores concentraciones de CO<sub>2</sub> se emiten en las chimeneas ubicadas en los puntos 1 y 2, seguido de los puntos 3 y 5. Las concentraciones más bajas registradas durante el monitoreo de las 3 de la tarde se presentaron en los puntos 7,8 y 9 debido a las condiciones de la celda (clausura) y al tiempo de disposición de los residuos sólidos. Al realizar la comparación entre los tres horarios de monitoreo se observa que las concentraciones más altas se presentan a las 3 de la tarde, en referencia a los puntos 1 y 2. Respecto a los demás puntos de monitoreo, no se observan mayores diferencias entre los valores registrados de CO<sub>2</sub>; son valores que están en el mismo rango de concentraciones.

En la Figura 72 se presenta el mapa referente a la representación espacial de las concentraciones de carga contaminante de CO<sub>2</sub>, durante el periodo de muestreo (1 semana).

**Figura 72** Concentraciones de carga contaminante de CO<sub>2</sub>

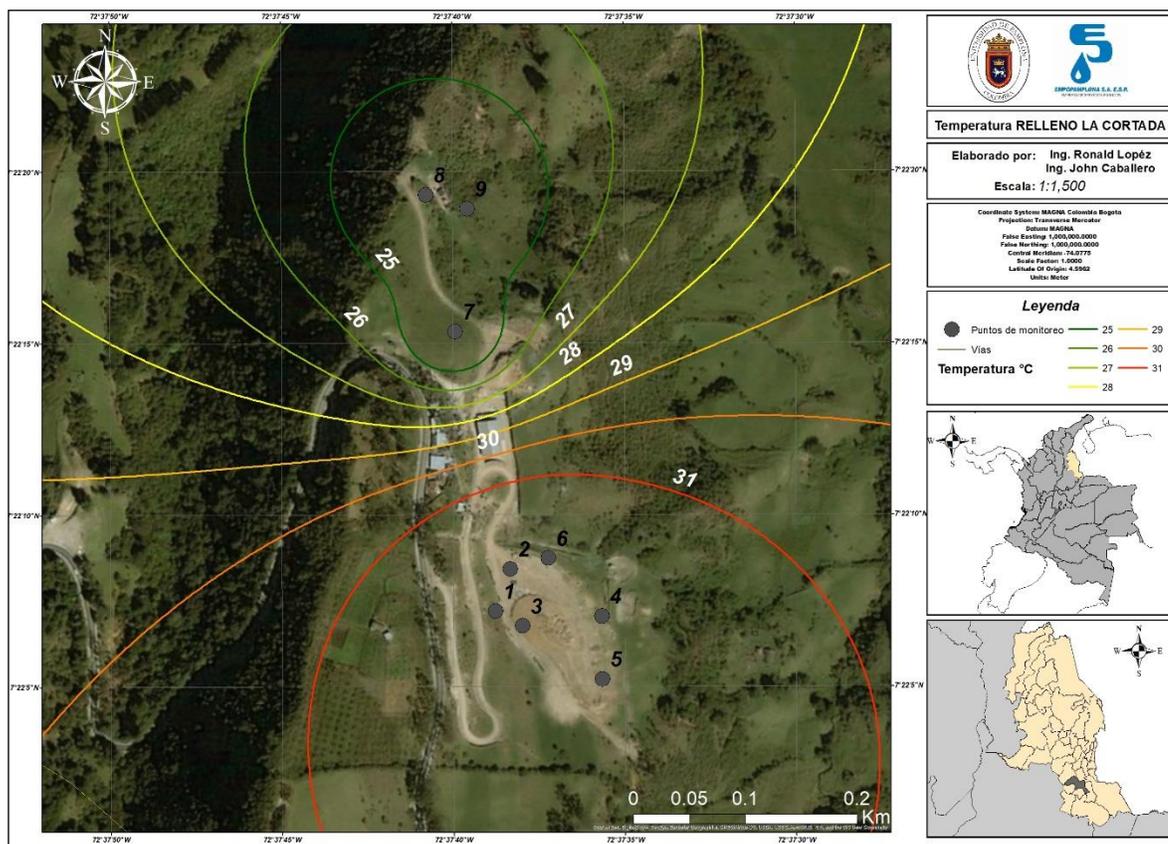


Fuente: López T, 2018

En el caso de las concentraciones de carga contaminante, los valores más altos se presentaron en el punto 1 y 2, teniendo en cuenta los monitoreos de CO<sub>2</sub> y caudal y el tiempo de disposición de los residuos en las celdas y la fase de generación de gases en que se encuentran (fase III y IV). Por otro lado, la menor carga contaminante por CO<sub>2</sub> se presentó en los puntos 7, 8 y 9, siendo estos los más bajos de todos los puntos, teniendo en cuenta que en estos puntos ya se dio clausura a las celdas y los valores registrados de caudal son muy bajos en comparación con los demás puntos. Los puntos 3 y 5 presentaron valores intermedios de carga contaminante; en los cuales se realiza el proceso continuo de disposición de los residuos sólidos.

En la Figura 73 se presenta el mapa referente a la representación espacial de los valores registrados de Temperatura (°C), durante el periodo de muestreo (1 semana).

**Figura 73** Valores de Temperatura (°C) registrados en el relleno sanitario regional “La Cortada”



Fuente: López T, 2018

En general, los valores de temperatura registrados en los sitios de monitoreo no presenta mayor variación. En los puntos 1 a 6 se mantiene la temperatura del gas en 31 °C. En los puntos 7 al 9 se presentan temperaturas del gas entre los 25 y los 28°C. cabe mencionar que en la zona cercana a los puntos 1 al 6 se lleva a cabo el proceso continuo de disposición final de los residuos, mientras que en la zona cercana a los puntos 7, 8 y 9 las celdas ya están clausuradas y, por tanto, se registraron valores de temperatura relativamente más bajos que los presentados en los puntos anteriores.

### 8.2.2 Análisis estadístico del monitoreo de CO<sub>2</sub>

A continuación, se presenta el análisis estadístico realizado a los datos obtenidos del monitoreo de CO<sub>2</sub>, caudal, Temperatura y los respectivos valores de carga contaminante.

En la Tabla 16 se muestra la estadística básica aplicada a los valores de concentraciones de CO<sub>2</sub> y carga contaminante, y los valores registrados de Temperatura del gas.

**Tabla 16** Estadística descriptiva de concentraciones de CO<sub>2</sub>, carga contaminante y Temperatura

Parámetro	[CO <sub>2</sub> ] (ppm)	Carga CO <sub>2</sub> (Kg/día)	T (°C)
n	189	189	189
Valor Máximo	7566.67	0.56	32.00
Valor Mínimo	628.33	0.00	24.00
Valor Medio	4812.32	0.05	29.33
Mediana	5491.00	0.01	32.00
Desviación Estándar	1992.47	0.07	3.78
Varianza	3969920.94	0.01	14.30
Coef. Variación	0.41	1.44	0.13
Curtosis	-0.79	12.88	-1.51
Coef. Sesgo	-0.67	2.67	-0.71

Fuente: López T, 2018

La mayor concentración de dióxido de carbono es de 7566.67 ppm, esto se puede deber a problemas de error instrumental del equipo de medición. La temperatura del gas osciló entre 24 y 32 °C en todos los puntos del monitoreo.

En la Tabla 17 se muestra el análisis de correlación entre los valores de CO<sub>2</sub> registrados en los tres horarios de monitoreo.

**Tabla 17** Análisis de correlación-Concentraciones horarias de CO<sub>2</sub>

	[CO <sub>2</sub> ] 8 am (ppm)	[CO <sub>2</sub> ] 1 pm (ppm)	[CO <sub>2</sub> ] 3 pm (ppm)
[CO <sub>2</sub> ] 8 am (ppm)	1		
[CO <sub>2</sub> ] 1 pm (ppm)	0.83	1	
[CO <sub>2</sub> ] 3 pm (ppm)	0.82	0.92	1

Fuente: López T, 2018

En la tabla anterior se muestra la relación existente entre las concentraciones tomadas en campo de dióxido de carbono según los periodos de muestreo, a las 8 am, a la 1 pm y a las 3 pm. La relación entre estas variables se analizó por medio del coeficiente de correlación de Pearson, y se determinó que las concentraciones

del contaminante a diferentes horas del día presentan una relación directamente proporcional para todo el período de monitoreo; y se considera una relación fuerte por la magnitud del coeficiente de correlación. Además, este comportamiento se mantiene proporcional en todos los puntos de monitoreo observándose la mayor relación de concentraciones del dióxido de carbono en horas de la tarde en los muestreos de la 1 y las 3 pm.

En la Tabla 18 se muestra el análisis de correlación entre las concentraciones de CO<sub>2</sub>, carga contaminante y Temperatura.

**Tabla 18** Análisis de correlación-Concentraciones de CO<sub>2</sub>, carga contaminante y Temperatura

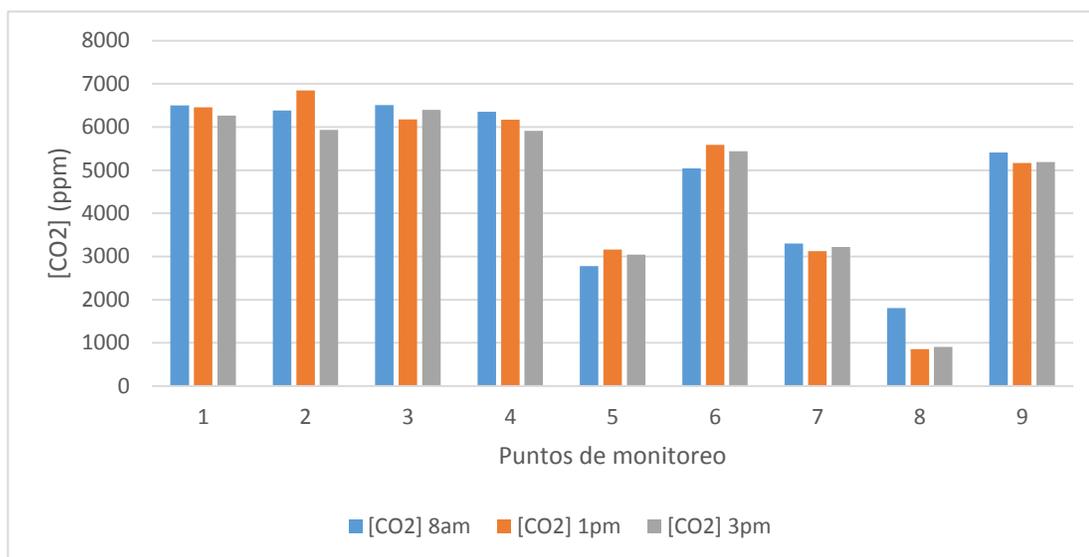
	<i>[CO<sub>2</sub>] (ppm)</i>	<i>Carga CO<sub>2</sub> (Kg/día)</i>	<i>Temperatura (°C)</i>
<i>[CO<sub>2</sub>] (ppm)</i>	1		
<i>Carga CO<sub>2</sub> (Kg/día)</i>	0.62	1	
<i>Temperatura (°C)</i>	0.60	0.57	1

**Fuente:** López T, 2018

Se observa la relación que presenta la concentración de dióxido de carbono, la carga contaminante y la temperatura por medio del coeficiente de correlación de Pearson. Se infiere una relación directamente proporcional entre la concentración de CO<sub>2</sub> y la carga contaminante, sin embargo, la magnitud de esta relación no es tan fuerte debido a la influencia de la variable del flujo de emisión del contaminante o caudal. De igual manera, la temperatura presenta relación directa con la concentración y la carga contaminante, sin presentar una relación positiva perfecta o que estas variables no son totalmente dependientes.

En la Figura 74 se muestra la comparación entre las concentraciones de CO<sub>2</sub> registradas durante cada horario de monitoreo.

**Figura 74** Concentraciones de CO<sub>2</sub> registradas durante el periodo de monitoreo

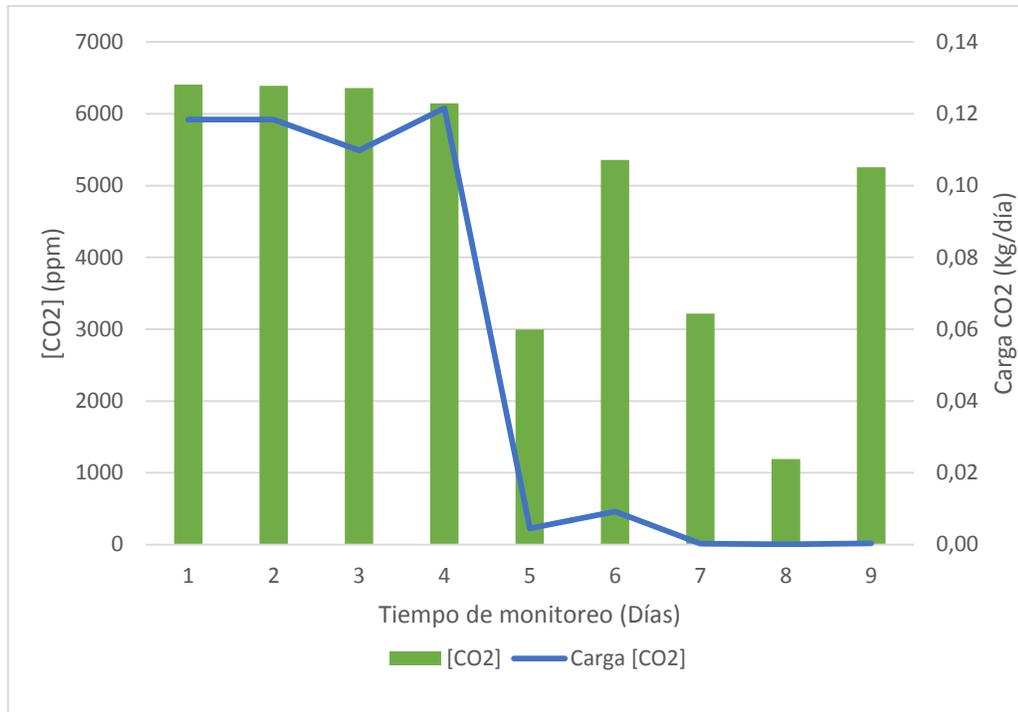


**Fuente:** López T, 2018

Las concentraciones de dióxido de carbono permanecen constantes en los primeros cuatro puntos de monitoreo, a diferencia de los demás puntos en los cuales se puede identificar una disminución en la concentración de este contaminante. Es imperativo mencionar, que los primeros cuatro puntos de monitoreo se encuentran ubicados en la zona donde actualmente se realiza la disposición de los residuos en el Relleno La Cortada; esto indica que son las chimeneas más recientes, por lo tanto, presentan mayor actividad de descomposición de los residuos. Por otra parte, los demás puntos de monitoreo se encuentran ubicados en chimeneas más antiguas, por esto la concentración es menor.

En la Figura 75 se muestra la representación de la relación entre las concentraciones de CO<sub>2</sub> y carga contaminante.

**Figura 75** Relación entre concentraciones de CO<sub>2</sub> y carga contaminante



**Fuente:** López T, 2018

En los primeros cuatro puntos de medición la concentración de dióxido de carbono presenta una relación directa con la carga contaminante, a diferencia del resto de puntos de medición en los cuales se observa que la concentración no se relaciona con la carga. Lo anterior a razón de la diferencia de flujo de emisión del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) entre los primeros puntos (1, 2, 3 y 4) y últimos (5, 6, 7, 8 y 9), pues como, ya se mencionó anteriormente los primeros corresponden a las chimeneas que entraron en funcionamiento más recientemente. Por ejemplo, el punto 6 presenta una concentración de CO<sub>2</sub> de 5355.68 ppm y una carga contaminante de 0.0092 kg/día, a diferencia del punto 4 que presenta una concentración de CO<sub>2</sub> de 6145.89 ppm y una carga contaminante de 0.1216 kg/día. En conclusión, las concentraciones de ambos puntos son similares pero el flujo de emisión del punto 4 es mayor, por este motivo su carga contaminante de dióxido de carbono emitida a la atmósfera es mayor que la del punto 6.

### **8.3 Comparación entre el análisis de ciclo de vida (ACV), Método de Tchobanoglous-Theisen-Vigil y monitoreo de CO<sub>2</sub>.**

Araque (2015) realizó un estudio en el relleno sanitario regional La Cortada en el cual determinó la emisión de gases efecto invernadero (CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>) producto de la descomposición de residuos sólidos. Para el cálculo de la cantidad de gases que

se emitirán durante el proceso de confinamiento y degradación de los residuos utilizo el método Tchobanoglous/Theisen/Vigil empleando el análisis fisicoquímico de la caracterización realizada.

**Tabla 19.** Comparación metodologías determinación de CO<sub>2</sub>

<b>Metodología</b>	<b>Resultado</b>
Análisis del Ciclo de Vida (CML 2001)	1200 kg CO <sub>2</sub> eq./tonelada
Tchobanoglous-Theisen_vigil	12154699 kg CO <sub>2</sub> eq./año
Monitoreo	165.49 kg CO <sub>2</sub> eq./año

**Fuente:** López T, 2018

Según se observa en la tabla 19 se utilizaron tres metodologías diferentes para la determinación de CO<sub>2</sub> equivalente. El Análisis del Ciclo de Vida estima el grado de contaminación generada por el tipo de residuos dispuestos en el relleno sanitario, por este motivo se expresa en kg CO<sub>2</sub> eq./tonelada resaltando que el componente que genera mayor impacto sobre el medio ambiente son los residuos de alimentos por su contenido en materia orgánica. Así mismo, la metodología de Tchobanoglous estima la contaminación realizando un análisis molar de elementos de carbono (C), hidrogeno (H), oxígeno (O) y nitrógeno (N), para así posteriormente calcular la cantidad de gas de CO<sub>2</sub> que se genera con la caracterización de residuos sólidos. Esta metodología difiere totalmente con el monitoreo realizado en campo, en el cual se establece un valor aproximado de 165.49 kg CO<sub>2</sub> eq./año; por otra parte según Araque (2015) utilizando la metodología de Tchobanoglous estimó un valor aproximado de 12154699 kg CO<sub>2</sub> eq./año.

Lo anterior radica en varias hipótesis, la principal es el margen de error presentado en el proceso de medición del dióxido de carbono, pues el equipo presento dificultades. Por otra parte, la metodología de Tchobanoglous establece la cantidad de CO<sub>2</sub> que se generara de acuerdo a la caracterización de los residuos sin tener en cuenta los tiempos o fases de generación de gases efecto invernadero que se presentan en el proceso de descomposición, en los cuales las primeras tres etapas se dan en transcurso de meses a diferencia de las ultimas que se dan en periodos de años. Esto es un factor fundamental en la diferencia de estas dos metodologías, sin embargo, aunque establecen valores diferentes son importantes en la estimación del potencial de contaminación e impacto al calentamiento global que se presentan en los procesos de disposición final de residuos sólidos.

## 9. CONCLUSIONES

En el municipio de Pamplona en los residuos sólidos del sector especial se presentó mayor predominancia en los plásticos, a su vez el tipo de plástico más usado es el polietileno tereftalato (PET) 18.81% seguido del polipropileno (PP) 11.22%. Por otra parte, en el sector oficial el principal componente son los otros residuos 26.23% y residuos de alimentos 22.18%. En el sector comercial, ruta 1 y ruta 2 el principal componente son los residuos de alimentos con 37.2%, 62.25% y 59.20% respectivamente.

En todos los municipios caracterizados se observó que las poblaciones de los estratos 1 y 2 presentan mayor disposición de residuos de alimentos, por otra parte, en los sectores oficiales este componente no presenta mayor relevancia. Lo anterior indica que las personas con menos capacidades económicas tienden a utilizar consumir en menor proporción productos enlatados o procesados aumentando su la producción de residuos sólidos orgánicos.

Los residuos de alimentos y los plásticos entre los que destaca en mayor proporción el polietileno tereftalato (PET), son los componentes que generan mayor impacto sobre el calentamiento global en kg de CO<sub>2</sub> eq., la destrucción de la capa de ozono en kg de CFC-11 eq., la toxicidad humana y ecotoxicidad terrestre en kg de 1,4-DCB eq., según la metodología CML 2001.

Las metodologías CML 2001, IPCC 2007 e IPCC 2013 establecen que el mayor componente que impacta en el calentamiento global en unidades de Kg de CO<sub>2</sub> equivalente son los residuos de alimentos debido a que su proceso de descomposición o degradación es más rápido a diferencia de los otros componentes. El plástico y el cartón representan el 30% y el 17% respectivamente en el impacto en el calentamiento global y en menor proporción los componentes papel, caucho y cuero, textiles y productos metálicos. Por otra parte, los componentes restantes no influyen en este impacto.

Los residuos de alimentos generan el mayor impacto sobre el medio ambiente siendo el principal que influye en un 70% en el calentamiento global en unidades de Kg de CO<sub>2</sub> eq., eutrofización en unidades de Kg de PO<sub>4</sub> eq. y oxidación fotoquímica en unidades de Kg de etileno eq. Por otra parte, el plástico es el segundo componente que representa mayor impacto con un porcentaje de 21. Los demás componentes no son significantes sobre estos impactos.

En los datos tomados de campo se infiere una relación directamente proporcional entre la concentración de CO<sub>2</sub> y la carga contaminante, sin embargo, la magnitud de esta relación no es tan fuerte debido a la influencia de la variable del flujo de emisión del contaminante o caudal. De igual manera, la temperatura presenta

relación directa con la concentración y la carga contaminante, sin presentar una relación positiva perfecta o que estas variables no son totalmente dependientes. Por otra parte, se determinó que las concentraciones del contaminante a diferentes horas del día presentan una relación directamente proporcional para todo el período de monitoreo; y se considera una relación fuerte por la magnitud del coeficiente de correlación. Además, este comportamiento se mantiene proporcional en todos los puntos de monitoreo observándose la mayor relación de concentraciones del dióxido de carbono en horas de la tarde en los muestreos de la 1 y las 3 pm.

En los primeros cuatro puntos de medición la concentración de dióxido de carbono presenta una relación directa con la carga contaminante, a diferencia del resto de puntos de medición en los cuales se identificó que la concentración no se relaciona con la carga. Lo anterior a razón de la diferencia de flujo de emisión del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) entre los primeros puntos (1, 2, 3 y 4) y últimos (5, 6, 7, 8 y 9), pues corresponden a las chimeneas que entraron en funcionamiento más recientemente.

## 10.RECOMENDACIONES

Es necesario realizar un monitoreo simultaneo de metano (CH<sub>4</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en las chimeneas del relleno sanitario La Cortada durante un periodo de tiempo mayor a una semana en diferentes épocas del año con el fin de determinar la capacidad de contaminación y cuantificar el impacto al calentamiento global, siendo estos contaminantes los principales precursores de este efecto.

Para la minimización de los impactos ambientales generados asociados al calentamiento global, por la operación del relleno Sanitario “La cortada” se proponen tres estrategias:

- Reducción en consumo o sustitución de insumos
- compensación en sumideros de CO<sub>2</sub>
- Aprovechamientos de biogás.

Se recomienda estimar impactos generados a nivel local por este tipo de contaminación, puesto que el Análisis del Ciclo de Vida y el software utilizado estima impactos a nivel global sin tener en cuenta las consecuencias generadas directamente en el área de ubicación del relleno sanitario La Cortada.

Realizar estudios y establecer alternativas de control, monitoreo y mitigación de la contaminación por emisión de estos gases efecto invernadero, identificando las áreas de mayor potencial de amortiguación y su capacidad de retención de estos contaminantes.

## 11. REFERENCIAS

Aguilar V, Q., De Vega, C., Taboada G, P y Aguilar, X. P. (2010). Potencial de recuperación de residuos sólidos domésticos dispuestos en un relleno sanitario. En: Revista de Ingeniería. ISSN: 0121-4993, p. 16-27.

Araque L, R. A. (2015). Valoración del impacto ambiental del calentamiento global en los servicios públicos de acueducto, alcantarillado y aseo mediante la aplicación del análisis del ciclo de vida caso de estudio Pamplona, Norte de Santander, Colombia. Universidad de Pamplona. Pamplona, Norte de Santander, Colombia.

Astrup J, A., Hoffman, L., T. Moller, B., y Schimidt, A. (1997). Life Cycle Assessment. Environmental Issues Series, p.13-16.

Ayres, R. (1995). Life Cycle Analysis: a critique. Resources, conservation and recycling, p.199-223.

Bogush, A., Stegemann, J y IWood, A. R. (2014). Element composition and mineralogical characterisation of air pollution control residue from UK energy-from-waste facilities, p.119-128.

Bovea M.D., Ibáñez F, V., Gallardo, A y Colomer M, F.J. (2010). Environmental assessment of alternative municipal solid waste management strategies. A Spanish case study, p. 2383-2395.

Cámbara V, J. L. (2012). Análisis de la confiabilidad de las metodologías EICV. Universidad de Oviedo. Master Universitario en Dirección de Proyectos.

Chacón V, R. (2008). Historia ampliada y comentada del análisis de ciclo de vida (ACV). En: Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería, p. 37-70.

Christensen, T. H., Cossu, R y Stegmann, R. (1996). Landfilling of Waste Biogas. ISBN: 41919400 2, E&FN Spon, Londres.

Departamento del distrito federal. (1985). Norma Mexicana NMX-AA-61-1985. Protección al ambiente-Contaminación del suelo-Residuos sólidos municipales-Determinación de la generación. México, D.F.

Empopamplona S.A E.S.P. (2012). Actualización del plan de manejo ambiental–relleno sanitario regional Pamplona. Pamplona.

- Frischknecht R., Jungbluth N., Althaus H.-J., Bauer C., Doka G., Dones R., Hischier R., Hellweg S., Humbert S., Köllner T., Loerincik Y., Margni M. y Nemecek T. (2007). Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods.ecoinvent report No. 3, v2.0. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf.
- Ichinose, D., Yamamoto, M., y Yoshida, Y. (2013). Productive efficiency of public and private solid waste logistics and its implications for waste management policy. *IATSS Research*, 36(2), p.98–105.
- Invidiata, A y Ghisi, E. (2016). Life-cycle energy and cost analyses of window shading used to improve the thermal performance of houses. *Journal of Cleaner Production*, 133, p.1371–1383.
- Islam, H., Jollands, M., & Setunge, S. (2015). Life cycle assessment and life cycle cost implication of residential buildings—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, p.129-140.
- Jeswani, H. K y Azapagic, A. (2016). Assessing the environmental sustainability of energy recovery from municipal solid waste in the UK. *Waste Management*, 50, p.346–363.
- Lazarevic, D y Martin, M. (2016). Life cycle assessments, carbon footprints and carbon visions: Analysing environmental systems analyses of transportation biofuels in Sweden. *Journal of Cleaner Production*, 137, p.249–257
- Lederer, J., Ongatai, A., Odeda, D., Rashid, H., Otim, S., y Nabaasa, M. (2015). The generation of stakeholder's knowledge for solid waste management planning through action research: A case study from Busia, Uganda. *Habitat International*, 50, p.99–109.
- Lewis, H., Gertzakis, J., Grant, T., Morelli, N., & Sweatman, A. (2001). *Design Environment: A Global Guide to Designing Greener Goods*. Greanleaf Publishing.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2005). Decreto 0838 de 2005, por el cual se modifica el decreto 1713 de 2002 sobre disposición final de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones. Bogotá D.C, Colombia.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Resolución 908 de 2008, por la cual se establecen las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmosfera por fuentes fijas y se dictan otras disposiciones. Bogotá D.C, Colombia.

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2012). Reglamento Técnico del sector de agua potable y saneamiento básico-RAS. Título F. sistemas de aseo urbano. Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico. Bogotá, D.C, Colombia. 264 p.

Norma Técnica Colombiana NTC-ISO 14040. (2007). Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia. Segunda actualización. Bogotá D.C, Colombia.

Parkes, O., Lettieri, P y Bogle, I. D. L. (2015). Life cycle assessment of integrated waste management systems for alternative legacy scenarios of the London Olympic Park. *Waste Management*, 40, p-157–166.

Pinzón U, L. F. (2010). Influencia de los rellenos sanitarios en el cambio climático. En: *Revista Gestión Integral en Ingeniería Neogranadina*. ISSN: 2145-5759, p. 1-13.

Presidencia de la Republica. (1974). Decreto 2811 de 1974, por el cual se dicta el código nacional de recursos naturales renovables y de protección al medio ambiente. Bogotá D.C, Colombia.

Presidencia de la república. (1996). Decreto 605 de 1996 por el cual se reglamenta la ley 142 de 1994 en relación con la prestación del servicio público domiciliario de aseo. Bogotá D.C, Colombia.

Rebitzer, G., Ekcalk, T., Frishknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., y Rydberg, T. (2004). Life Cycle Assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environment International*, p.701-720.

Rivera A, H. (s.f). Determinación de criterios para mejoramiento de procesos de disposición final de residuos sólidos urbanos en Pamplona Norte de Santander, Colombia, a través de un análisis del ciclo de vida. (Tesis doctoral en curso).

Romero, B. (2003). El análisis del ciclo de vida y la gestión ambiental. *Tendencias tecnológicas*, p.91-97.

SETAC. (1993). *Guidelines for Life Cycle Assessment: a code of practice*. Bruselas.

Tchobanoglous, G., Theisen, H y Vigil, S. (1994). *Gestión Integral de Residuos Sólidos*. Volumen I. editorial Mac Graw Hill. ISBN:84-481-1776-6.

Turner, D. A., Williams, I. D y Kemp, S. (2015). Greenhouse gas emission factors for recycling of source-segregated waste materials. *Resources, Conservation and Recycling*, 105, p.186–197.

Vallejo, A. (2004). Utilización del análisis del ciclo de vida en la evaluación del impacto ambiental del cultivo bajo invernadero mediterráneo. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España.

## ANEXOS

### ANEXO A. Registro Fotográfico



Tipos de residuos generados en el municipio de Pamplona



Separación y recolección de residuos sólidos para la caracterización



Transporte y acondicionamiento de muestras de residuos sólidos



Clasificación y pesaje de los residuos sólidos.



<b>metálicos</b>									
<b>Vidrio</b>									
<b>Productos cerámicos, ceniza, rocas y escombros</b>									
<b>Huesos</b>									
<b>Otros</b>									