

**EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD ECONÓMICA DE ALTERNATIVAS DE  
APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO A PARTIR DE RESIDUOS SÓLIDOS  
URBANOS EN COLOMBIA.**

**SANTIAGO LÓPEZ SANJUÁN**  
**CÓDIGO: 201038555**

Trabajo de grado como requisito para optar al título de  
Ingeniero Industrial

**DIRECTORA:**  
**ING. JENNY FABIANA GAVIRIA CUEVAS M. Sc**



**UNIVERSIDAD DEL VALLE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**  
**SANTIAGO DE CALI**  
**2018**

## TABLA DE CONTENIDO

|                                                                                                                                          |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>INTRODUCCIÓN.....</b>                                                                                                                 | <b>4</b>  |
| <b>1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA-.....</b>                                                                                               | <b>5</b>  |
| <b>2. OBJETIVOS.....</b>                                                                                                                 | <b>8</b>  |
| 2.1 OBJETIVO GENERAL.....                                                                                                                | 8         |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....                                                                                                           | 8         |
| <b>3. MARCO TEÓRICO.....</b>                                                                                                             | <b>9</b>  |
| <b>3.1 CRECIMIENTO POBLACIONAL.....</b>                                                                                                  | <b>9</b>  |
| 3.1.1 CRECIMIENTO POBLACIONAL MUNDIAL.....                                                                                               | 9         |
| 3.1.2 CRECIMIENTO POBLACIONAL EN LATINOAMERICA.....                                                                                      | 9         |
| 3.1.3 CRECIMIENTO POBLACIONAL EN COLOMBIA.....                                                                                           | 9         |
| <b>3.2 GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.....</b>                                                                                   | <b>10</b> |
| 3.2.1 GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS GLOBAL.....                                                                                 | 10        |
| 3.2.2 GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN LATINOAMERICA.....                                                                       | 10        |
| 3.2.3 GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN COLOMBIA.....                                                                            | 10        |
| <b>3.3 DISPOSICIÓN Y TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.....</b>                                                                    | <b>11</b> |
| 3.3.1 DISPOSICIÓN Y TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN EL MUNDO.....                                                             | 11        |
| 3.3.2 DISPOSICIÓN Y TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN LATINOAMÉRICA.....                                                        | 11        |
| 3.3.3 DISPOSICIÓN Y TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN COLOMBIA.....                                                             | 11        |
| <b>3.4 ACCESO A LA ENERGÍA ELÉCTRICA EN COLOMBIA.....</b>                                                                                | <b>12</b> |
| 3.4.1 CONSUMO ENERGÉTICO Y DEMANDA DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA.....                                                                          | 12        |
| 3.4.2 IMPACTOS ECONÓMICOS Y SOCIALES POR LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN COLOMBIA.....                                             | 12        |
| <b>4. COMPARACIÓN DEL PANORAMA DE APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DE COLOMBIA CON RESPECTO AL MODELO EUROPEO.....</b>        | <b>13</b> |
| 4.1 REVISIÓN DE PARÁMETROS COMUNES ENTRE COLOMBIA Y EUROPA.....                                                                          | 13        |
| 4.2 PRODUCCIÓN ENERGÍA PRIMARIA Y ELECTRICIDAD EN COLOMBIA Y EUROPA.....                                                                 | 19        |
| 4.3 APROVECHAMIENTO Y DISPOSICIÓN FINAL DE RSU EN COLOMBIA Y EUROPA Y TENDENCIAS PARA LA PRODUCCIÓN DE ELECTRICIDAD CON BASE EN RSU..... | 24        |
| <b>5. EVALUACIÓN ECONÓMICA LAS OPCIONES DE APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO WASTE TO ENERGY EN EL CONTEXTO COLOMBIANO.....</b>                 | <b>36</b> |
| <b>6. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA EVALUACIÓN ECONÓMICA PARA EL CONTEXTO COLOMBIANO.....</b>               | <b>45</b> |

|                                           |           |
|-------------------------------------------|-----------|
| <b>7. CONCLUSIONES.....</b>               | <b>55</b> |
| <b>8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b> | <b>57</b> |
| <b>9. ANEXOS.....</b>                     | <b>59</b> |

## **LISTA DE TABLAS**

|                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Perfil comparativo de los países seleccionados.....                                              | 15 |
| Tabla 2. Clasificación según el GII 2017 de los países seleccionados.....                                 | 16 |
| Tabla 3. Hechos relevantes y características de la industria en el país en materia de competitividad..... | 18 |
| Tabla 4. Revisión Comparativa Artículos Seleccionados.....                                                | 34 |
| Tabla 5. Denominación de los procesos.....                                                                | 37 |
| Tabla 6. Definición de las alternativas estudiadas.....                                                   | 37 |
| Tabla 7. Costos para cada proceso.....                                                                    | 38 |
| Tabla 8. Porcentaje material recuperado en Colombia.....                                                  | 39 |
| Tabla 9. Precio de venta materiales, subproductos y electricidad en Colombia.....                         | 40 |
| Tabla 10. Distribución de los RSU en Colombia.....                                                        | 41 |
| Tabla 11. Categorías del personal y número de personal de acuerdo con el proceso.....                     | 42 |
| Tabla 12. Conceptos para el calculo de la producción de energía y subproductos.....                       | 44 |
| Tabla 13. Costos anuales para cada proceso por toneladas procesadas.....                                  | 46 |
| Tabla 14. Producción de electricidad anual por proceso.....                                               | 47 |
| Tabla 15. Ingresos por cada proceso por tonelada y por año.....                                           | 49 |
| Tabla 16. Costos por alternativa.....                                                                     | 50 |
| Tabla 17. Ingresos por cada alternativa.....                                                              | 51 |
| Tabla 18. Utilidad para cada alternativa.....                                                             | 53 |
| Tabla 19. Utilidad para cada alternativa con variaciones en la distribuciones de los RSU.....             | 53 |
| Tabla 20. Utilidad para cada alternativa con variaciones en las tasas de transformación.....              | 54 |

## **LISTA DE GRÁFICOS**

|                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfico 1. Clasificación según el GII 2017 de los países seleccionados vs promedio europa..... | 17 |
| Gráfico 2. Producción energía primaria Colombia.....                                           | 20 |
| Gráfico 3. Producción energía primaria Europa.....                                             | 21 |
| Gráfico 4. Evolución del consumo eléctrico en Colombia.....                                    | 22 |
| Gráfico 5. Distribución fuentes de producción de electricidad Colombia.....                    | 23 |
| Gráfico 6. Distribución fuentes de producción de electricidad Europa.....                      | 23 |
| Gráfico 7. Costo neto por tonelada de diferentes técnicas.....                                 | 24 |
| Gráfico 8. Número ECAs reportadas en el año 2016 por departamento.....                         | 27 |
| Gráfico 9. Capacidad de almacenamiento de las ECAs por municipio.....                          | 28 |
| Gráfico 10. Promedio de la capacidad operacional de las ECAs por municipio.....                | 29 |
| Gráfico 11. Toneladas aprovechadas por departamento.....                                       | 30 |
| Gráfico 12. Material aprovechado en Coombia.....                                               | 30 |

## INTRODUCCIÓN

La necesidad global actual por mitigar los impactos ambientales y sociales que producen la actividad humana en el planeta Tierra, ha motivado numerosas iniciativas para desarrollar nuevos mecanismos que permitan satisfacer el consumo de productos y servicios por parte de la población y a su vez proteger el medio ambiente y aportar en la construcción de bienestar en las diferentes esferas sociales a lo largo del planeta, sin dejar atrás el creciente estilo de vida que se viene adoptando con la evolución de las tecnologías y la sociedad.

Dicha evolución, junto con el crecimiento poblacional, proponen grandes desafíos para las autoridades gubernamentales, encargadas de la gestión de aspectos tales como acceso a educación, salud, alimentación, vivienda, entre otros, que siguen la línea de crecimiento a medida que la población crece.

Colombia por su parte, no es ajeno a esta tendencia mundial y hoy en día hace parte del grupo de países candidatos a implementar sistemas y alternativas de gestión, en respuesta a las problemáticas sociales y ambientales existentes y a posicionarse como referente en cuanto a cuidado del medio ambiente y bienestar integral se refiere.

Es por este motivo que en este trabajo de grado, se plantea el interés en dos principales necesidades: El acceso a la energía eléctrica y el consumo de productos y servicios, de las cuales se desprenden situaciones problema tales como la contaminación ambiental y problemas de salud e higiene, causados por la explotación de combustibles fósiles, minería, e inadecuada disposición de Residuos Sólidos Urbanos (RSU), ésta última generada por el modelo lineal de consumo presente en la mayoría de países latinoamericanos.

Finalmente, el aporte que brinda este trabajo se basa en un análisis práctico y concreto de las alternativas existentes que pueden ser consideradas en Colombia, para satisfacer las necesidades anteriormente mencionadas de manera que se cumpla con el objetivo principal de disminuir las problemáticas asociadas a dichas necesidades.

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Según World Population History (2017), la población mundial actual es de 7.348.200.000 habitantes, mil millones de habitantes más de lo que se registraba en el año 2005, lo que implica un aumento poblacional del 13.6% respecto a las cifras de comienzos del segundo milenio. De acuerdo con la Organización de Naciones Unidas (2017) la población mundial ascenderá a 8.500 millones para el año 2030 y a 9.700 millones para el año 2050, 15.67% y 32% de aumento respectivamente respecto a la cifra actual.

Las cifras para Latinoamérica de acuerdo a Naciones Unidas revelan que en el 2017 la población fue de 645 millones de habitantes, representando el 9% de la población mundial y una proyección para el 2030 de 718 millones de habitantes lo que significará un aumento del 11.3%.

Colombia por su parte, en el año 2017 tuvo una población de 49 millones de habitantes. Para el año 2030 la población colombiana ascenderá a 53 millones, con un porcentaje de crecimiento 8.3% respecto al año 2017 (Naciones Unidas, 2015).

El crecimiento poblacional está directamente relacionado con un fenómeno que impacta a todas las poblaciones desarrolladas y en desarrollo alrededor del mundo: La producción de residuos sólidos urbanos (RSU). La población mundial produjo un total de 9.411.912.960 millones de toneladas de RSU desde 2012, de las cuales aproximadamente el 50% va a permanecer inalterable, sin ninguna intervención o algún tipo de tratamiento o reciclaje, generando contaminación y/o problemas de salud pública. (Waste Atlas, 2017)

En Colombia, en 2014 la generación de residuos sólidos urbanos y rurales se estimó en 13,8 millones de toneladas anuales. Sin embargo, se estima que la generación de residuos de la zona urbana y rural podría llegar a 18,74 millones de toneladas en 2030, un incremento del 13,4% en la producción per cápita de residuos sólidos. De acuerdo con estas estimaciones, Colombia debe tener a futuro un esquema de gestión de residuos sólidos que le permita atender esa creciente presión. (CONPES 3874, 2015) Según el Banco Interamericano de Desarrollo BID (2015), la cobertura del servicio de disposición final adecuada (en rellenos sanitarios) de RSU es aproximadamente del 55% (medido como porcentaje de la población), lo cual implica que aún existe en Latinoamérica una alta proporción de residuos que no se dispone y/o trata adecuadamente (45%), lo que termina afectando directamente a la población y al medio ambiente, ya que los residuos que no son dispuestos o tratados de manera adecuada generan problemas de salud pública, contaminación, problemas de movilidad, etc, en los asentamientos urbanos y rurales.

En materia de reciclaje, se estima que en Latinoamérica únicamente el 2,2% de los RSU se recicla dentro de esquemas formales. Muy pocos países cuentan con infraestructura formal para la clasificación de RSU y su reciclaje. En Latinoamérica la recuperación de materiales reciclables es realizada mayormente por el sector informal, a través de recuperadores/recicladores urbanos, que se estiman en unos 4 millones (BID, 2015).

Esta información deja entrever la importante necesidad de estrategias que permitan poner de nuevo en circulación los recursos y materiales que actualmente ya hacen parte del sistema y de esta manera reducir el impacto ambiental y social generado por la explotación de materias primas y adicionalmente reduciendo la cantidad de residuos finales y su disposición.

De la misma manera, otra necesidad -inherente a las poblaciones en crecimiento- es el acceso a energía eléctrica, la cual crece en la misma medida en la que la población crece, es por esto, que las autoridades nacionales deben implementar medidas y estrategias que permitan un oportuno y eficiente suministro a todos los consumidores tanto regulados como no regulados. Para el caso Colombia, en relación con el sector energético y en particular, con el subsector eléctrico, en 2013 la generación total alcanzó los 59.988,9 GWh, de los cuales el 68% provino de centrales hidroeléctricas y el 31% de termoeléctricas; por su parte, la demanda total de energía eléctrica fue de 59.370,1 GWh y un consumo total de energía (CTE) que alcanzó 788 mil barriles equivalentes de petróleo diarios (mbepd), lo que indica un crecimiento del 16% respecto del promedio logrado entre 2005 y 2008. La contribución de los combustibles fósiles constituyó el 80% del CTE, a base de un 40% de petróleo crudo, un 21% de gas natural, un 10% de productos derivados del petróleo importados y un 9% de carbón. El 20% restante provino de las energías renovables, principalmente de energía hidráulica (el 10%) y biocombustibles (el 10%). (BID, 2017)

No obstante, la producción de energía eléctrica cuenta con la otra cara de la moneda: La explotación carbonífera y de petróleo crudo. Dicha explotación implica actividades que a su paso producen impactos ambientales y sociales negativos al recurso natural y social del país, y adicionalmente evidencian la necesidad de control por parte de las autoridades a dichas prácticas y la enorme necesidad de alternativas de producción de energía eléctrica que mitiguen el daño causado por la explotación y sus actividades relacionadas.

Tal es la dimensión de la situación, que el ex Ministro de Ambiente Gabriel Vallejo, calificó como una “tragedia incalculable” el derrame de 410.000 galones de crudo en la quebrada Pianulpí, que surte al río Guisa, y éste a su vez al río Mira que alimenta el acueducto de Tumaco, en el año 2015. El ex ministro también aseguró que este suceso dejó sin agua a más de 160.000 personas de la zona y que dicho derrame es el que más daños ambientales y sociales ha causado en los últimos 10 años en el país (El Espectador, 2015). Por otra parte, el carbón no se queda atrás: en los municipios productores en el Cesar - tierra de la multinacional Drummond - que es de donde sale el 48% del carbón colombiano, hay un promedio de necesidades básicas insatisfechas (NBI) del 76%, 31 puntos más que la cifra departamental y 20 más que la nacional (54%). Sin embargo, la principal preocupación, derivada del impacto ambiental radica, por su puesto, en los efectos observados en humanos. En especial la acción de pequeñas partículas de mineral sobre los pulmones, lo que puede llegar a generar neumoconiosis”, una grave enfermedad pulmonar, ocasionada por la deposición de residuos sólidos en los bronquios que, por lo menos, ya ha sido reportada en Boyacá (El Tiempo, 2014).

Considerando que Colombia debe trazar un plan de acción, en el cual se consideren estrategias circulares que permitan la reinserción y la reutilización de recursos en el proceso productivo y de suministro de servicios y productos tomando en cuenta los retos económicos y límites técnicos existentes en el país, que satisfagan las necesidades de la población, y a la vez sustituir los modelos lineales actualmente utilizados en la mayoría de países latinoamericanos, en los cuales no hay recuperación de materia ni energía. Y con base en los retos y efectos por mitigar encontrados, que a su vez suponen grandes necesidades a satisfacer en el marco social y ambiental del país, se pretende dar respuesta a la siguiente pregunta de investigación:

- ¿Se puede evaluar la viabilidad económica de alternativas de aprovechamiento energético a partir de residuos sólidos urbanos en Colombia mediante la adaptación de un modelo de gestión de residuos sólidos en Europa?

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo General**

Evaluar la viabilidad económica de alternativas de aprovechamiento energético a partir de residuos sólidos urbanos en Colombia mediante la adaptación de un modelo de gestión de residuos sólidos en Europa.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Comparar el panorama de aprovechamiento de residuos sólidos urbanos de Colombia con respecto al modelo europeo desde una perspectiva teórica.
- Evaluar económicamente las opciones de aprovechamiento energético Waste to Energy, considerando parámetros técnicos y económicos en el contexto colombiano.
- Realizar el análisis de sensibilidad por medio de la construcción de escenarios a partir de los resultados obtenidos en la evaluación económica para el contexto colombiano.

### **3. MARCO TEÓRICO**

#### **3.1 CRECIMIENTO POBLACIONAL**

##### **3.1.1 CRECIMIENTO POBLACIONAL MUNDIAL**

Según World Population History (2017), la población mundial actual es de 7.348.200.000 habitantes, mil millones de habitantes más de lo que se registraba en el año 2005, lo que implica un aumento poblacional del 13.6% respecto a las cifras de comienzos del segundo milenio. De acuerdo con la Organización de Naciones Unidas (2017) la población mundial ascenderá a 8.500 millones para el año 2030 y a 9.700 millones para el año 2050, 15.67% y 32% de aumento respectivamente respecto a la cifra actual.

Un 60% de la población mundial vive en Asia (4.400 millones), un 16% en África (1.200 millones), un 10% en Europa (738 millones), un 9% en Latinoamérica y el Caribe (634 millones) y el 5% restante en América del Norte (358 millones) y Oceanía (39 millones). China (1.400 millones) e India (1.300 millones) continúan siendo los países con mayor población. Ambos cuentan con más de 1.000 millones de personas y representan el 19% y 18% de la población mundial respectivamente (Naciones Unidas, 2015).

##### **3.1.2 CRECIMIENTO POBLACIONAL EN LATINOAMÉRICA**

El número de habitantes en América Latina ascenderá hacia mediados de 2016 a 625 millones de personas, seis millones más de los que se estima que había a mitad de 2015, según las últimas proyecciones de población de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Esa cifra supone casi el doble de la población registrada en 1975, cuando había 316 millones de personas, de acuerdo con la más reciente publicación del Observatorio Demográfico. La población latinoamericana siguió creciendo hasta sumar 512 millones en 2000 y se calcula que alcanzará 680 millones en 2025 y 779 millones en 2050.

##### **3.1.3 CRECIMIENTO POBLACIONAL EN COLOMBIA**

Colombia en el año 2017 tuvo una población de 49 millones de habitantes. Para el año 2030 la población colombiana ascenderá a 53 millones, con un porcentaje de crecimiento 8.3% respecto al año 2017 (Naciones Unidas, 2015).

Así mismo, el lugar de residencia de la población en Colombia cambió drásticamente en el último siglo. “En 1938, 70% de los habitantes estaban ubicados en áreas rurales, mientras 30% en las ciudades. En 2017 76% se encuentra en las ciudades frente a 24% de las áreas rurales. (Revista Dinero, 2017).

## **3.2 GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS**

### **3.2.1 GENERACIÓN DE RESIDUOS URBANOS GLOBAL**

La revisión global de la gestión de los residuos sólidos realizada por el Banco Mundial en el año 2012, estableció que para ese año las ciudades del mundo generaban un promedio de 1,3 billones de toneladas de residuos sólidos al año y se espera que la cifra llegue a 2,2 billones de toneladas al año 2025. En este reporte se estima que a diario cada habitante del planeta genera 1,2 kg de residuos sólidos, aunque existen grandes diferencias en la generación entre los diferentes países y ciudades del mundo. Por ejemplo, un estudio realizado por el Banco Mundial en el año 2011 indica que en Estados Unidos la producción per cápita de residuos sólidos es de 2,08 Kg/hab-día, mientras el promedio en América Latina y el Caribe era de 0,93 Kg/hab-día. Lo anterior se origina a partir de una correlación entre la cantidad de residuos sólidos generados, la riqueza (Producto Interno Bruto, PIB) y el desarrollo de las ciudades (Alcaldía Santiago de Cali, 2015).

### **3.2.2 GENERACIÓN DE RESIDUOS URBANOS EN LATINOAMÉRICA**

En América Latina y el Caribe (ALC), el Informe de la Evaluación Regional del Manejo de Residuos Sólidos Urbanos (EVAL 2010) estimó que la generación per cápita de residuos sólidos domiciliarios (RSD) alcanza a 0,63 kg/hab-día, mientras que la RSM asciende a 0,93 kg/hab-día. Los indicadores per cápita obtenidos para la región implican una generación urbana diaria aproximada de 295.000 ton de RSD y 436.000 de RSM (Alcaldía Santiago de Cali, 2015).

### **3.2.3 GENERACIÓN DE RESIDUOS URBANOS EN COLOMBIA**

En 2014 la generación de residuos sólidos urbanos y rurales se estimó en 13,8 millones de toneladas anuales; es decir, cerca de 283 kilogramos por persona. Esta cifra representa un poco más de la mitad del promedio de los países de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE), que está en 530 kilogramos. Sin embargo, se estima que la generación de residuos de la zona urbana y rural podría llegar a 18,74 millones de toneladas en 2030, lo que significa cerca de 321 kilogramos por persona al año o un incremento del 13,4% en la producción per cápita de residuos sólidos. De acuerdo con estas estimaciones, Colombia debe tener a futuro un esquema de gestión de residuos sólidos que le permita atender esa creciente presión (CONPES 3874, 2015).

### **3.3 DISPOSICIÓN Y TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS**

Antes que nada, se debe hacer precisión sobre los conceptos “tratamiento” y “disposición final” aplicados a los RSU. De acuerdo al Instituto Colombiano de Normas Técnicas (ICONTEC) el “tratamiento es el conjunto de operaciones, procesos o técnicas mediante los cuales se modifican las características de los residuos sólidos incrementando sus posibilidades de reutilización, aprovechamiento o ambos para minimizar los impactos ambientales y los riesgos para la salud humana” y la disposición final “es el proceso de aislar y confinar los residuos en especial los no aprovechables, en forma definitiva, en lugares técnicamente seleccionados y diseñados para evitar la contaminación y los daños o riesgos a la salud humana y al ambiente” (Avendaño, 2015)

#### **3.3.1 DISPOSICIÓN Y TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN EL MUNDO.**

**Malmö (Suecia).** Ha integrado un "modelo de eco-ciclo" que incluye separación en origen, instalaciones que generan energía de la basura, reutilización, reciclaje y compostaje a partir de restos de comida y jardín. Gracias a ello los residuos que llegan al vertedero han pasado del 22% en 2001 al 0,7% en 2013; se cubre el 60% de las necesidades de calefacción de Malmö y el área de Burlöv, evitando combustibles fósiles; y se producen 25.000 toneladas anuales de biofertilizante, 10.000 toneladas de compost, biogás equivalente a dos millones de litros de gasolina y varios metales, incluidos preciosos (Revista Eroski Consumer, 2016).

#### **3.3.2 DISPOSICIÓN Y TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN LATINOAMÉRICA.**

La EVAL 2010 estimó que los residuos del 54,4% de los habitantes de América Latina y el Caribe se disponen en rellenos sanitarios, un aumento significativo con respecto al 22,6% registrado en 2002. Al mismo tiempo, el uso de vertederos a cielo abierto disminuyó del 45,3% al 23,3%. Quizás las principales razones que explican este fenómeno estén dadas por el fuerte impulso que algunos países han dado a la normativa, obligando al cierre de vertederos a cielo abierto no controlados y definiendo específicamente las características técnicas que debe tener una solución adecuada de disposición final (Alcaldía Santiago de Cali, 2015)

#### **3.3.3 DISPOSICIÓN Y TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN COLOMBIA.**

Se observa que el 72,0% de los municipios (789) se encuentra disponiendo en rellenos sanitarios, el 15,0% en botaderos (163), el 5,2% en planta integral (57), el 4,6% en celda transitoria (51), el 2,0% en celda de contingencia (27), el 1,0% en cuerpos de agua (14) y todavía el 0,1% quema los residuos (1) (Alcaldía de Santiago de Cali, 2015).

### **3.4 ACCESO A LA ENERGÍA ELÉCTRICA EN COLOMBIA**

#### **3.4.1 CONSUMO ENERGÉTICO Y DEMANDA DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA.**

En relación con el sector energético, y en particular con el subsector eléctrico, en 2012 la capacidad instalada de generación eléctrica de Colombia era de 14.361 MW, y el país se ubicaba en el sexto lugar de América Latina y el Caribe, detrás de Argentina, Brasil, Chile, México y Venezuela. Ese mismo año la generación total alcanzó los 59.988,9 GWh, de los cuales el 68% provino de centrales hidroeléctricas y el 31% de termoeléctricas; por su parte, la demanda total de energía eléctrica fue de 59.370,1 GWh. De acuerdo con las cifras de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), al cierre de 2012 el 95,6% de los hogares tenía acceso a electricidad (BID, 2015).

En 2013, el consumo total de energía (CTE) de Colombia alcanzó 788 mil barriles equivalentes de petróleo diarios (mbepd), lo que indica un crecimiento del 16% respecto del promedio logrado entre 2005 y 2008. Así mismo, la contribución de los combustibles fósiles constituyó el 80% del CTE, a base de un 40% de petróleo crudo, un 21% de gas natural, un 10% de productos derivados del petróleo importados y un 9% de carbón. El 20% restante provino de las energías renovables, principalmente de energía hidráulica (el 10%) y biocombustibles (el 10%) (BID, 2015).

#### **3.4.2 IMPACTOS ECONÓMICOS Y SOCIALES POR LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN COLOMBIA.**

La sísmica, método empleado en la exploración de hidrocarburos mediante explosiones controladas para detectar posibles yacimientos de petróleo, ha afectado las fuentes de agua subterráneas (acuíferos) y ha contaminado importantes ríos por vertimientos de desechos en sus cauces (Agencia de Noticias UN, 2017).

Por otra parte, los problemas de orden público vividos en los últimos años en Colombia, también hicieron parte del impacto ambiental generado. Un caso relevante fue el mencionado por el exministro de Ambiente, Gabriel Vallejo, que calificó como una 'tragedia incalculable' el derrame de 410.000 galones de crudo en Tumaco en la quebrada Pianulpí, que surte al río Guisa, y éste a su vez al río Mira que alimenta el acueducto de Tumaco, ubicado en el departamento de Nariño. (El Espectador, 2015)

Por otra parte, el carbón no se queda atrás: en los municipios productores en el Cesar - tierra de la multinacional Drummond -, que es de donde sale el 48% de nuestro carbón, hay un promedio de necesidades básicas insatisfechas (NBI) del 76%, 31 puntos más que la cifra departamental y 20 más que la nacional (54%). (El Espectador, 2015)

Y, como si fuese poco, en el Caribe la deforestación ha sido mucho mayor que en cualquier otra región. Entre 2000 y 2007, año tras año, en el norte desaparecen 19 hectáreas (ha) por cada mil, mientras que en todo el territorio la tasa era de cinco hectáreas. A su vez, las zonas carboneras del Cesar talaban, anualmente, 46 hectáreas. (El Espectador, 2015)

Los datos también son alarmantes en el tema de salud, si bien el departamento del Cesar tiene una amplia cobertura (de 116% en 2012), los números no reflejan la calidad del servicio. La muestra es que hace dos años la tasa de mortalidad infantil (TMI) en Colombia era de 18 por cada mil nacidos vivos, mientras que en el Cesar y La Guajira, el segundo departamento que produce más carbón (42%), las defunciones ascienden a 20 y 32, respectivamente. (El Espectador, 2015)

Adicionalmente, a pocos metros del río Humadea (departamento del Meta) se encuentra el pozo exploratorio Lorito 1, del bloque petrolero CPO-9, licenciado en 2012 a Ecopetrol por la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (Anla).

Para construir la plataforma los habitantes del sector fueron expropiados de sus predios, por lo que en 2013 las comunidades bloquearon el acceso del taladro para generar presión, consiguiendo que la Sentencia T-652 de 2013 de la Corte Constitucional, suspendiera la explotación del pozo (Agencia de Noticias UN, 2017).

#### **4. COMPARACIÓN DEL PANORAMA DE APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DE COLOMBIA CON RESPECTO AL MODELO EUROPEO**

El propósito principal de este capítulo será establecer una comparación entre Colombia y Europa, considerando aspectos relevantes tales como: Datos geográficos y territoriales, gestión de la innovación y competitividad tecnológica entre ambos territorios, profundizando en la producción energética primaria y su posterior transformación en energía eléctrica. De este modo, se abrirá paso al eje temático principal del capítulo, que será el aprovechamiento de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) y el Waste to Energy (WTE), que, mediante la observación y búsqueda bibliográfica de aplicaciones reales, actuales y pertinentes de estos, se logrará aterrizar la factibilidad de la aplicación de nuevas alternativas y/o tecnologías para el aprovechamiento de RSU y producción eléctrica en Colombia.

Partiendo de la necesidad de conocer aspectos básicos entre Colombia y Europa, útiles para la comparación e identificación del panorama nombrado, se diseña *el perfil comparativo* (J. Malinauskaite et al., 2017) de los países seleccionados, debido a que permite observar con claridad información tal como población, área en kilómetros cuadrados, densidad poblacional, entre otros, permitiendo así la comparación simple y clara entre estos dos territorios.

##### **4.1 REVISIÓN DE PARÁMETROS COMUNES ENTRE COLOMBIA Y EUROPA**

Para esta sección se consideró el aporte que hicieron J. Malinauskaite et al. (2017), al determinar un grupo de diez países, que -según los autores- son los que mejor representan el contexto europeo, por lo tanto, en esta investigación, Europa va a estar representado por este conjunto. Los países fueron escogidos porque ofrecen un rango de perspectivas en términos de sus diferentes etapas de desarrollo económico y del resto de los países que están por debajo de ese nivel. Diferentes tamaños de economías (Pequeñas, por ejemplo, Estonia, Letonia, Lituania y Eslovenia) (Grande - El Reino Unido); diferentes Olas de Adhesión (Países de la Unión Europea UE y Área Económica Europea AEE): Italia como uno de los estados co fundadores de la UE; Estonia, Letonia, Lituania, Polonia y Eslovenia como los estados miembros más nuevos que se unieron a la UE en 2004, el Reino Unido como el país potencial para abandonar la UE y Noruega como la representación de un país del Área Económica Europea. Finalmente, posicionamiento geográfico, Norte (Noruega), Sur (Grecia, Italia, España), Este y Centro (Estonia, Letonia, Lituania, Polonia y Eslovenia) y Oeste (Reino Unido).

A continuación, en la Tabla 1, se presenta el perfil comparativo de los países seleccionados, entendiéndose como Colombia y el grupo de países europeos anteriormente nombrados.

Tabla 1. Perfil comparativo de los países seleccionados.

| PAÍS        | POBLACIÓN<br>(Millones) | ÁREA EN<br>KILÓMETROS<br>CUADRADOS | DENSIDAD<br>POBLACIONAL | UNIDADES<br>ADMINISTRATIVAS                                                                                                                        |
|-------------|-------------------------|------------------------------------|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Colombia*   | 49.7                    | 1,142,000                          | 43.52                   | 32 departamentos: 1123 Municipios y 5 Distritos                                                                                                    |
| Estonia     | 1.3                     | 45,227                             | 28.8                    | 213 municipios: 183 municipios rurales y 30 Ciudades                                                                                               |
| Grecia      | 10.8                    | 131,957                            | 86.4                    | 13 regiones                                                                                                                                        |
| Italia      | 62.8                    | 302,073                            | 201.32                  | 8040 municipios                                                                                                                                    |
| Letonia     | 1.9                     | 64,573                             | 30,19                   | 110 municipios y 9 ciudades independientes                                                                                                         |
| Lituania    | 2.9                     | 65,286                             | 44.1                    | 10 condados divididos en 60 Municipios                                                                                                             |
| Noruega     | 5.3                     | 304,282                            | 14                      | 19 regiones administrativas/426 Municipios                                                                                                         |
| Polonia     | 38.4                    | 312,679                            | 123                     | 2479 municipios                                                                                                                                    |
| Eslovenia   | 2.1                     | 20,273                             | 102                     | 212 municipios                                                                                                                                     |
| España      | 46.4                    | 505,944                            | 92                      | 17 comunidades autónomas, 2 ciudades con estatus de autonomía y 8125 Instituciones Locales.                                                        |
| Reino Unido | 65.6                    | 248,528                            | 250                     | Inglaterra: 353 Autoridades locales; Gales: 22 Autoridades locales y Escocia: 32 Concilios de Condado; Irlanda del Norte: 11 Concilios de Distrito |

FUENTE: Adaptado de J. Malinauskaite et al. (2017)

\*Los datos proporcionados para Colombia fueron extraídos del DANE a la fecha de la investigación

La comparación que se observa en la Tabla 1, en cuanto a variables como población, densidad poblacional y unidades administrativas, se complementa con la observación realizada por medio del Índice Global de Innovación (GII, por sus siglas en inglés), el cual es un indicador que permite determinar las capacidades y los resultados en materia de innovación de las economías del mundo. Éste es realizado de forma conjunta por la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (OMPI), la Universidad de Cornell y la Escuela de Negocios INSEAD. (SNCCTI, 2017)

*“... El índice evalúa dos grupos de indicadores: indicadores de entrada (insumos) e indicadores de salida (resultados). En el primer grupo, se evalúan las instituciones, el capital humano e investigación, infraestructura, sofisticación del mercado y sofisticación de negocios. En el segundo grupo, se analizan los resultados en términos de producción de conocimiento y tecnología y la producción creativa. La relación entre estos dos índices se denomina razón de eficiencia, la cual expresa qué tan eficiente es un país en la generación de innovación teniendo en cuenta la calidad y cantidad de los insumos empleados.” (SNCCTI, 2017)*

A continuación, en la Tabla 2, se presenta la clasificación del GII 2017 adaptada de los 10 países europeos y Colombia.

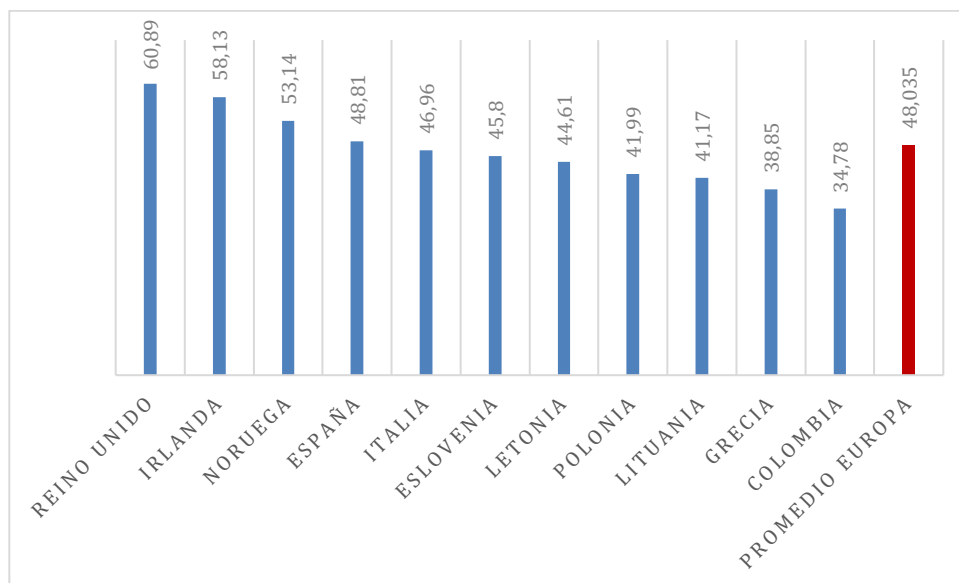
Tabla 2. Clasificación según el GII 2017 de los países seleccionados

| GII RANKING 2017 | PAÍS/ECONOMÍA | PUNTUACIÓN (0-100) | GII RANKING 2016 | CAMBIOS |
|------------------|---------------|--------------------|------------------|---------|
| 5                | Reino Unido   | 60.89              | 3                | -2 (↓)  |
| 10               | Irlanda       | 58.13              | 7                | -3 (↓)  |
| 19               | Noruega       | 53.14              | 22               | 3 (↑)   |
| 28               | España        | 48.81              | 28               | 0 (→)   |
| 29               | Italia        | 46.96              | 29               | 0 (→)   |
| 32               | Eslovenia     | 45.80              | 32               | 0 (→)   |
| 33               | Letonia       | 44.61              | 34               | 1 (↑)   |
| 38               | Polonia       | 41.99              | 39               | 1 (↑)   |
| 40               | Lituania      | 41.17              | 36               | -4 (↓)  |
| 44               | Grecia        | 38.85              | 40               | -4 (↓)  |
| 65               | Colombia      | 34.78              | 63               | -2 (↓)  |

FUENTE: Adaptado de (SNCCTI, 2017)

En el Gráfico 1, se ilustra el promedio entre la puntuación más alta (Reino Unido) y la más baja (Grecia) de los países europeos, el cual es de 48.035, en comparación con la puntuación de Colombia, claramente se observa que la puntuación de Colombia se encuentra muy por debajo del promedio europeo.

Gráfico 1. Clasificación según el GII 2017 de los países seleccionados vs Promedio Europa



FUENTE: Elaboración Propia

Por otro lado, hablando en términos de competitividad, (Serrano Moya, 2014) afirma que “... las capacidades tecnológicas de los países y su competitividad tienen piedras angulares, en el conocimiento, el stock tecnológico alcanzado, la infraestructura y las instituciones, sumando el stock de capital humano.” Es por esto que vale la pena revisar el estado de Colombia y Europa con relación a estos pilares mencionados y comparar dichos estados en orden para encontrar puntos de mejora y brechas entre el contexto colombiano y europeo.

(Colciencias, 2015) por su parte, presenta un análisis comparativo de la competitividad en la industria colombiana en relación con Irlanda y España, lo que permite complementar el aporte de (Serrano Moya, 2015) y observar con cifras y elementos compartivos, el estado de la competitividad, además de revisar hechos relevantes en ambos contextos, las cifras y los elementos considerados por Colciencias son presentados en la Tabla 3.

Finalmente, toda la comparación hecha en esta sección, entre Colombia y Europa, además de brindar un panorama claro en materia de competitividad e innovación, abre la puerta a la descripción del panorama energético de estos dos territorios.

Tabla 3. Hechos relevantes y características de la industria en el país en materia de competitividad

| Elementos                                                        | Características en otros países                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Situación en la industria colombiana                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Políticas, sistema de innovación</b>                          | <p>Generar espacios y condiciones propicias que desencadenen procesos endógenos de desarrollo.</p> <p><i>Compromiso multiestamental</i> (Gobierno-empresa-academia-sector financiero) orientado a la inversión en innovación y desarrollo y a la cobertura en educación superior.</p>                                                                                                                                                                                                                                            | <p>El porcentaje de inversión en innovación y desarrollo para Irlanda es de 1,5 y para España 0,8; entretanto Colombia solo dispone de 0,3 % de su PIB.</p> <p>El porcentaje de cobertura en educación terciaria para Irlanda es de 41%, para España 51%, y para el caso colombiano del 17%.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>Especialización de la producción y los recursos asociados</b> | <p><i>Economía intensiva en bienes de valor agregado, alta tecnología y capital humano.</i></p> <p>Su diversificada estructura productiva es explicada principalmente por la industria manufacturera y el sector servicios, y cada una de las actividades realizadas posee alto valor agregado, con gran potencial exportador, con un desarrollo equitativo y sostenible en el tiempo.</p> <p>Predominan las nuevas tecnologías transversales, mientras prevalecen manufacturas básicas que han sido altamente tecnificadas.</p> | <p>De hecho, el crecimiento de la economía en la primera mitad de los noventa estuvo explicado por un aumento de la demanda interna, asociado al crecimiento relativo de los sectores de bienes de consumo, y a la pérdida de participación de los sectores de bienes intermedios y de capital. En este incremento pudo verificarse que la economía industrial colombiana esta fundamentada en la producción de bienes de consumo corriente: las empresas del sector industrial producen bienes primarios o productos relativamente simples y la tecnología es asimilada, en parte, a través de importaciones y algo mediante inversión externa e imitación. Se observa una manufactura intensiva en mano de obra y orientada a la explotación básica de recursos naturales, condiciones poco favorables y sostenibles en el entorno actual.</p> <p>En el año 2004, según reportes de la Dian, en la oferta exportadora predominaron las actividades intensivas en recursos naturales, con una participación aproximada del 50% del total. A estas les siguen en orden de importancia las manufacturas básicas de plásticos, textiles, cuero, metales, alimentos y papel y en menor porcentaje la industria pesada.</p> |
| <b>Empleo. Recurso humano</b>                                    | <p><i>La fuerza laboral –altamente capacitada– se concentra en los sectores industriales, y de servicios.</i></p> <p>Los mayores niveles de empleo en la industria manufacturera, se generan en sectores de alta tecnología, los más innovadores.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                            | <p>Hoy todavía no se ve una clara tendencia hacia sectores más intensivos en tecnología y conocimientos, que permitan generar un mayor valor agregado.</p> <p>La proporción de personal involucrado en actividades de innovación y desarrollo por millón de personas está, para Irlanda en 2.132, España 1.561,9 y Colombia 324.</p> <p>En la industria colombiana, la mayor concentración de personas empleadas, de acuerdo con la Encuesta Anual Manufacturera del año 2000, está en las actividades de: alimentos, textiles y confecciones, química, bebidas, y maquinaria no eléctrica, que representan el 72,9% de las personas empleadas en la industria (en actividades dedicadas a la producción de bienes de consumo corriente).</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |

FUENTE: (Colciencias, 2015)

## 4.2 PRODUCCIÓN ENERGÍA PRIMARIA Y ELECTRICIDAD EN COLOMBIA Y EUROPA

De acuerdo con la información reportada por el Banco Interamericano de Desarrollo (2017) en su trabajo *Dossier Energético: Colombia*, “... la unidad de medida para los flujos de energía es miles de barriles equivalentes de petróleo por día (mbepd), una transformación sencilla de la unidad de medida que utiliza la Agencia Internacional de Energía (AIE), que es la de toneladas equivalentes de petróleo por año”. (BID, 2017)

Según información del (BID, 2017), en Colombia hubo un incremento en la Producción de Energía Primaria (PEP) en un 45% con respecto al promedio registrado entre 2005 y 2008, alcanzando 2.521 mbepd. El carbón lideró en la PEP, manteniéndose por encima de todas las demás fuentes primarias, del mismo modo que ha sucedido desde inicios de siglo. La contribución del carbón fue 1.116,01 mbepd a la PEP, un 28% más que en 2005–08, que registró 875 mbepd. El 44% de la PEP estuvo representada por el carbón y provino, principalmente, de las laderas occidentales de la Serranía del Perijá, en los departamentos de La Guajira y Cesar, al noreste del país. Según la UPME, las compañías mineras de Cesar representaron el 52% de la producción total de carbón en 2012.

El (BID, 2017), reportó también que en la segunda posición se ubicó el petróleo crudo, aportando 1.051 mbepd y representando el 42% de la PEP y que el incremento en la producción de petróleo con respecto al período 2005–08 fue del 84%. Además, los hidrocarburos representaron la producción restante en Colombia y esta correspondió al gas natural, que generó unos 198 mbepd equivalentes al 8% de la producción total. Se registró un aumento del 58% con relación al promedio de 2005–2008, que fue de 125 mbepd.

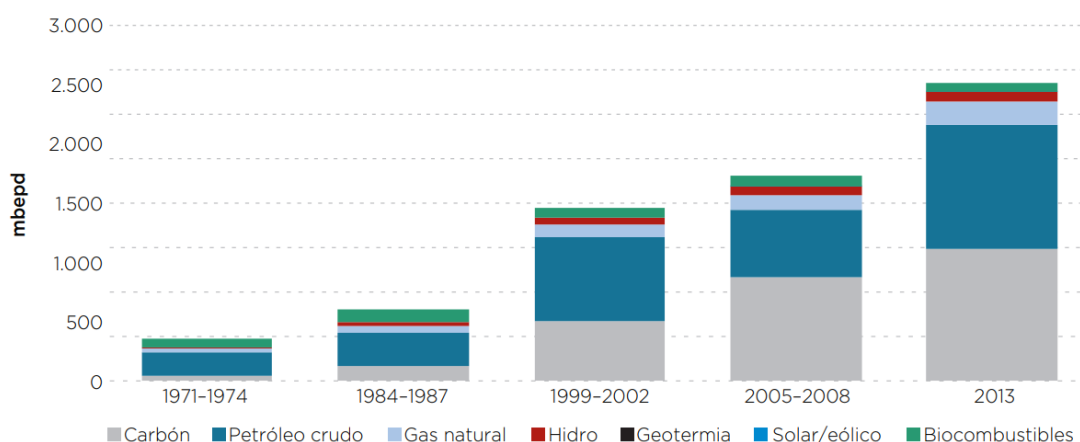
Finalmente, el (BID, 2017), aseguró que el porcentaje restante de la PEP fue completado por la energía hidráulica (con el 3% del total), los biocombustibles (también con el 3% del total) y la energía eólica (con el 0,003%). La energía hidráulica fue suministrada por 18 centrales de alta capacidad y numerosas centrales hidroeléctricas pequeñas del Sistema Interconectado Nacional. Dentro de estas centrales se destacan San Carlos (1.240 MW de capacidad instalada), Guavio (1.200 MW), Chivor (1.000 MW), Porce III (660 MW) y Pagua (600 MW). El gráfico 2 presenta la distribución histórica de las diferentes en la PEP en Colombia.

La producción de energía primaria en Europa por su parte en 2015, estuvo dividida entre una serie de diferentes fuentes de energía según lo reportado por (Eurostat, 2017), en donde la más importante, en lo que se refiere al tamaño de su contribución, fue la energía nuclear (28,9 % del total). Esta fue particularmente relevante en Francia, donde representó más del 80% de la producción nacional de energía primaria, por su parte en Bélgica el porcentaje de participación de energía nuclear fue ligeramente inferior a las dos terceras partes (65,0 %), y en Eslovaquia se acercó a los tres quintos (62,6 %); en otros países, el porcentaje de energía nuclear en la producción primaria fue inferior a la mitad del total y en catorce Estados miembros de la UE no hubo ninguna contribución

registrada de alguna energía nuclear; adicionalmente, el Gobierno alemán ha anunciado planes para cerrar todos sus reactores nucleares en 2022 como fecha límite.

En terminos de fuentes de energía renovables, en 2014 más de la cuarta parte (26,7 %) de la producción total de energía primaria estuvo representada por este tipo de fuentes, en lo que corresponde a los combustibles sólidos (18,9 %, principalmente carbón) representó un valor menor de una quinta parte y aún una cifra menor en el caso del gas natural (14,0 %). La única fuente importante de producción de energía primaria diferente al carbón fue el petróleo (9,8 %). En el gráfico 3 se puede observar la proporción de cada tipo de fuente de energía primaria en Europa.

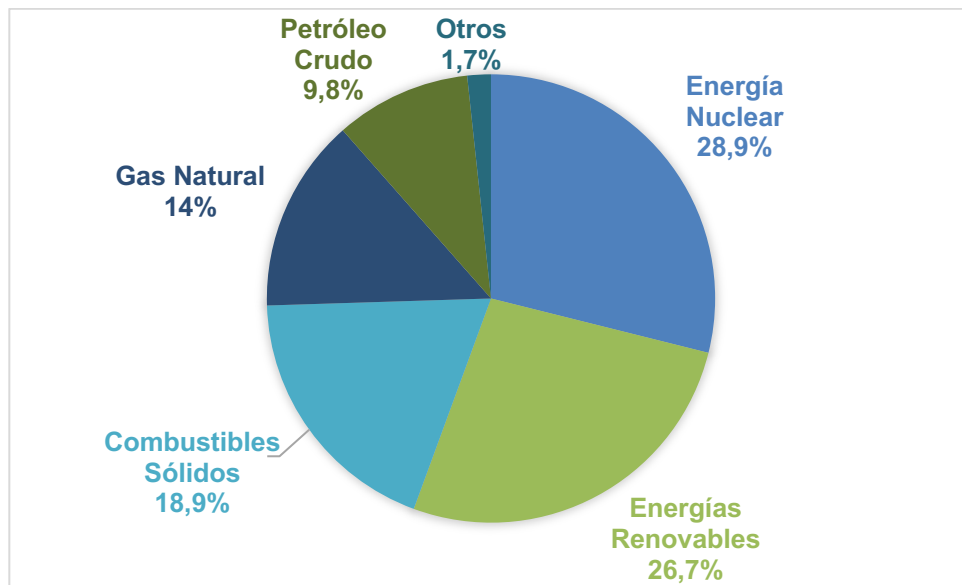
Gráfico 2. Producción energía primaria Colombia



FUENTE: BID 2017

El aumento de la producción primaria de la Europa a partir de fuentes de energía renovables fue superior al de todos los demás tipos de energía; este crecimiento se mantuvo relativamente estable en el período 2005-2015, con un ligero descenso en la producción en 2011. A lo largo de este período de diez años, la producción procedente de energías renovables se incrementó un 71,0 %, sustituyendo, hasta cierto punto, la producción de otras fuentes de energía. Por el contrario, los niveles de producción de las otras fuentes de energía primaria cayeron, principalmente en los casos del petróleo crudo (-43,9 %), el gas natural (-43,5 %) y los combustibles sólidos (-25,7 %), con una caída más moderada del 14,1 % en el caso de la energía nuclear. (Eurostat, 2017)

Gráfico 3. Producción de energía primaria Europa



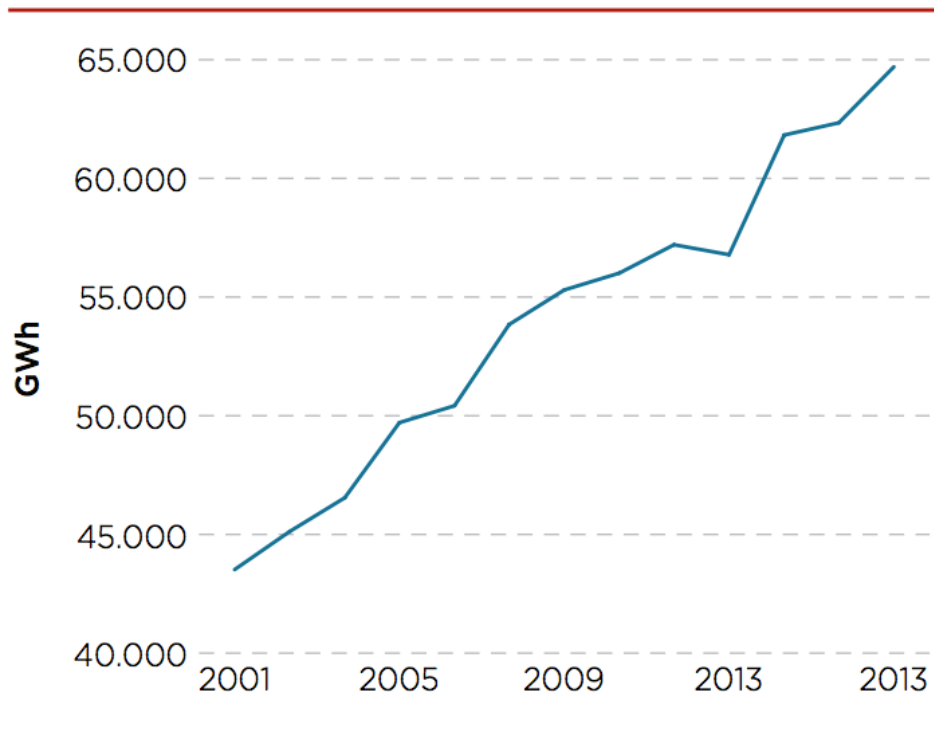
Fuente: Eurostat 2017.

Colombia en materia de producción de electricidad, registró según el (BID, 2017) que la producción de electricidad para cubrir la demanda durante 2013 alcanzó 64.686 GWh. Aceleradamente, el consumo de energía eléctrica incrementó desde comienzos de los años setenta (con 16 mbepd) hasta la actualidad, con un registro de 91,35 mbepd para 2013, 470% fue el incremento representado en el consumo. Adicionalmente, es evidente un promedio en el crecimiento de 3,2% respecto a la última década (2002–12), tal como se muestra en el Gráfico 4.

De acuerdo con el (BID, 2017), la capacidad instalada para generación de electricidad en 2013 en Colombia era de 14,5 GW, valor que se consideró estable desde 2000. El 67,83% de la generación de Colombia estuvo representado por las plantas hidroeléctricas, mientras que el aporte de las centrales termoeléctricas fue de 32,04%. Otras fuentes que aportaron, pero en menor proporción, fueron las generadoras eólicas y los biocombustibles suministrando el 0,12% del total, (Gráfico 5). En las termoeléctricas, las plantas de gas natural agruparon el 67% de la capacidad instalada total, seguidas por las generadoras a base de carbón con el 22% de la capacidad y las plantas a base de fuel oil con el 7% del total.

Por su parte, en Europa, según información de (Eurostat, 2017), la electricidad neta total generada fue 3.07 millones de gigavatios hora (GWh) en 2015, esta cifra fue 1.3% más alta que la del año anterior, lo que representó el final de un periodo de cuatro reducciones consecutivas en producción. El nivel de generación de electricidad en Europa en 2015 fue 4.8% más baja que su pico realtivo en 2008, cuando la producción total producida alcanzó los 3.22 millones de GWh.

Gráfico 4. Evolución del consumo eléctrico en Colombia



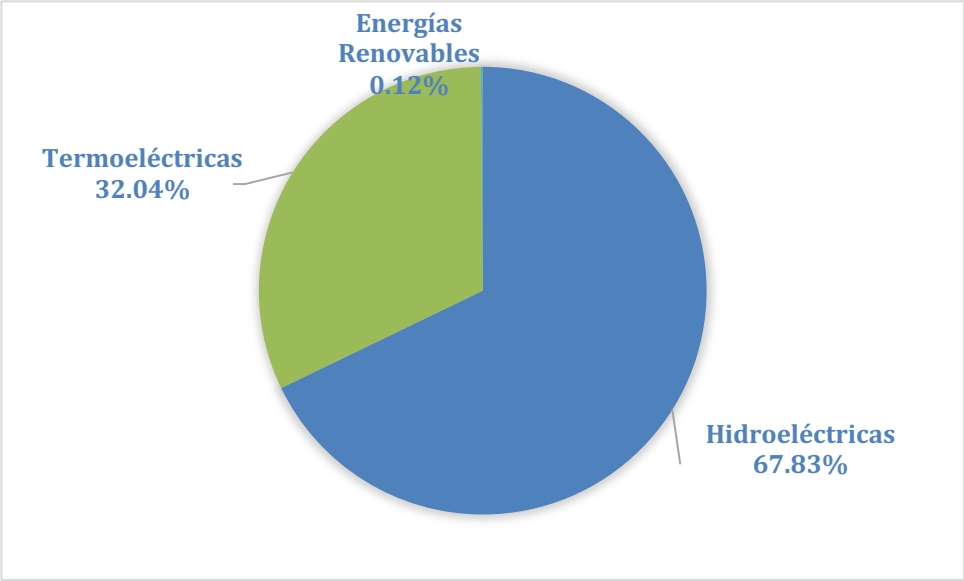
FUENTE: BID, 2017

Adicionalmente, casi la mitad (48.1%) de la electricidad neta generada en Europa en 2015 vino de combustibles (tales como gas natural, carbón y petróleo), mientras que más de un cuarto (26.4%) vino de estaciones de energía nuclear. Entre las fuentes de energía renovables (Solar, Eólica y Otros) mostradas en el gráfico 6, la contribución más alta en la generación de electricidad en 2015 fue de las plantas hidroeléctricas (11.9%), seguida de las turbinas de viento (9.7%) y la energía solar (3.5%).

La contribución relativa, de las fuentes de energía renovable en relación con la generación de electricidad neta de Europa creció entre 2005 y 2015 de 13.3% a 25.3%, según lo dicho por (Eurostat, 2017), mientras que, en contraste, la importancia de combustibles presentó una disminución de 56.4% a 48.1%, del mismo modo, las plantas nucleares pasaron de 30% a 26.4% en su contribución en la electricidad generada por estas. Entre las fuentes de energía renovable, la proporción de electricidad neta generada por parte de la energía solar y eólica incrementó en gran manera, de menos de 0.1% en 2005 pasó a 3.5% en el 2015 para la energía solar y de 2.2% en 2005 a 9.7% en el 2015 para las turbinas eólicas.

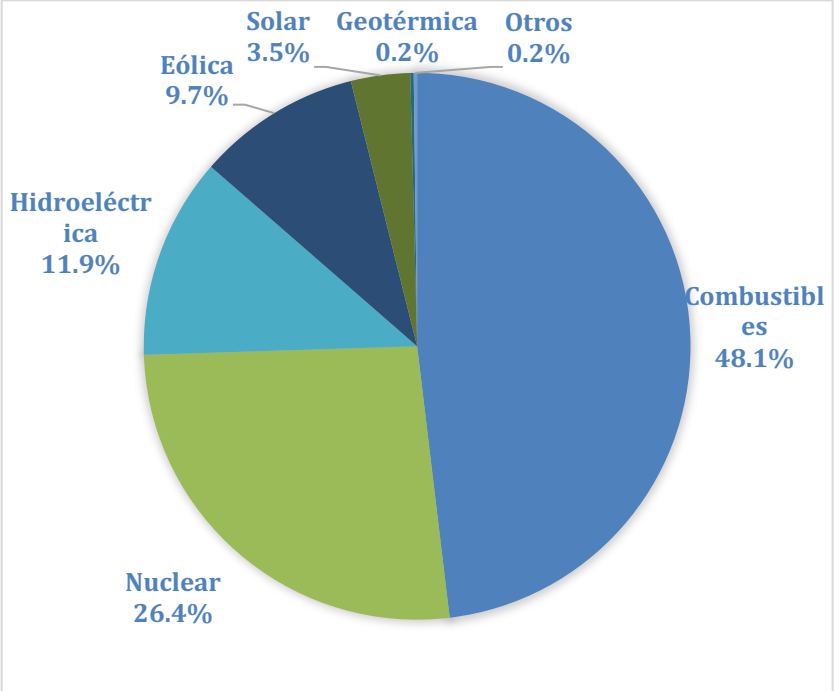
Una vez desarrollados los dos ejes temáticos relacionados con competitividad e innovación y producción de energía y electricidad, esta investigación continúa para desarrollar el tercer eje temático dedicado a la observación del aprovechamiento y disposición final de RSU y las tendencias existentes en materia de producción de electricidad con base en RSU, existentes tanto en Colombia como en Europa.

Gráfico 5. Distribución fuentes de producción de electricidad Colombia



FUENTE: BID, 2017

Gráfico 6. Distribución fuentes de producción de electricidad Europa



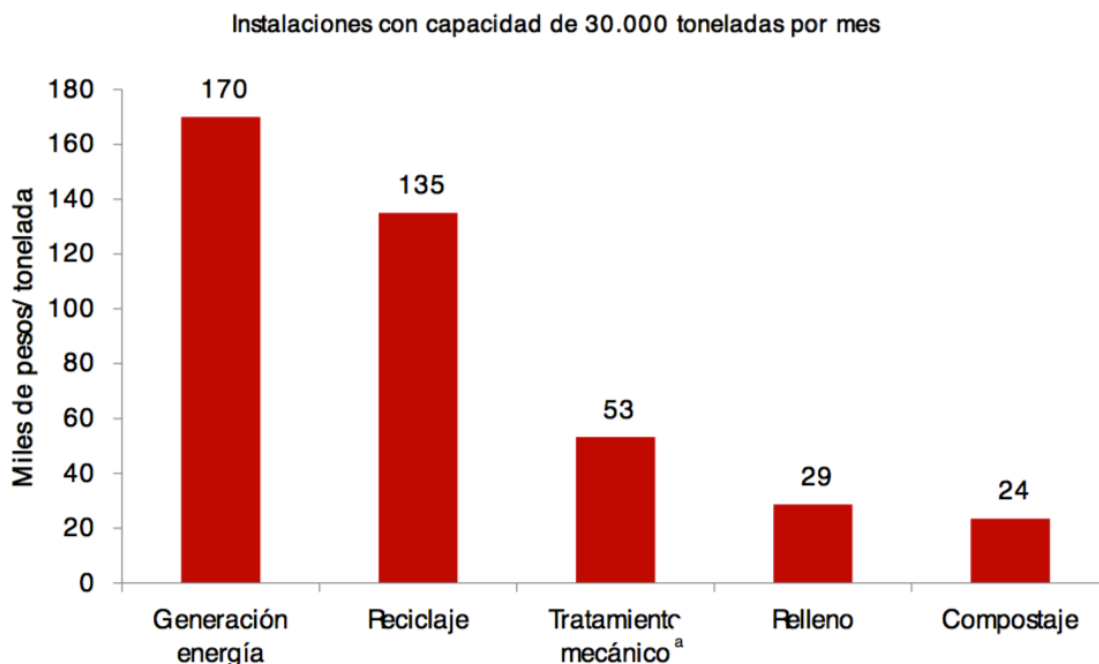
FUENTE: Eurostat, 2017

### 4.3 APROVECHAMIENTO Y DISPOSICIÓN FINAL DE RSU EN COLOMBIA Y EUROPA Y TENDENCIAS PARA LA PRODUCCIÓN DE ELECTRICIDAD CON BASE EN RSU

A continuación, se presenta una revisión del aprovechamiento y disposición de residuos sólidos en Colombia, que parte del *Estudio nacional para el desarrollo de Infraestructura. sector residuos* desarrollado por el Departamento Nacional de Planeación en 2015, documento adoptado en el CONPES 3874, fuente con la cual se pretende darle validez al panorama presentado en esta investigación.

Como se mencionó anteriormente el DNP realizó un estudio económico, con el objetivo de conocer los costos de algunas alternativas para el aprovechamiento de RSU (Gráfico 7) y de esta manera identificar posibles obstáculos económicos para la implementación de nuevas alternativas dicho fin, los resultados fueron compartidos por el Banco Interamericano de Desarrollo en el año 2015, a continuación, se presentan los resultados:

Gráfico 7: Costo neto por tonelada de diferentes técnicas



Fuente: DNP, con base en estudio realizado para Colombia sobre técnicas alternativas de tratamiento disposición final o aprovechamiento de residuos sólidos (Banco Interamericano de Desarrollo [BID], 2015).

Nota: <sup>(a)</sup> el tratamiento mecánico incluye la estabilización de la fracción orgánica previo a su disposición final (compostaje al aire libre).

Del mismo modo, de acuerdo con información reportada en el (CONPES 3874, 2015), se realizaron evaluaciones financieras a las actividades de aprovechamiento de RSU existentes en Colombia, bajo condiciones actuales, y estas demostraron que los costos operacionales son superiores a los ingresos obtenidos por la comercialización de los

materiales y por la tarifa de la actividad de aprovechamiento del servicio público de aseo. No obstante, no se han tenido en cuenta los costos ambientales y en la salud de la disposición final en rellenos sanitarios. Un ejemplo es el metano generado en los rellenos, este es un gas de efecto invernadero (GEI) y su costo de tratamiento no está aún incluido en el costo de disposición final de la tarifa del servicio público de aseo. De la misma manera, aumentar la vida útil de los productos por medio de la reutilización, genera ahorros en energía, agua y materia prima y disminuye la elaboración de nuevos productos y materiales. Estos beneficios intrínsecos no se obtienen con el enterramiento y no se han internalizado.

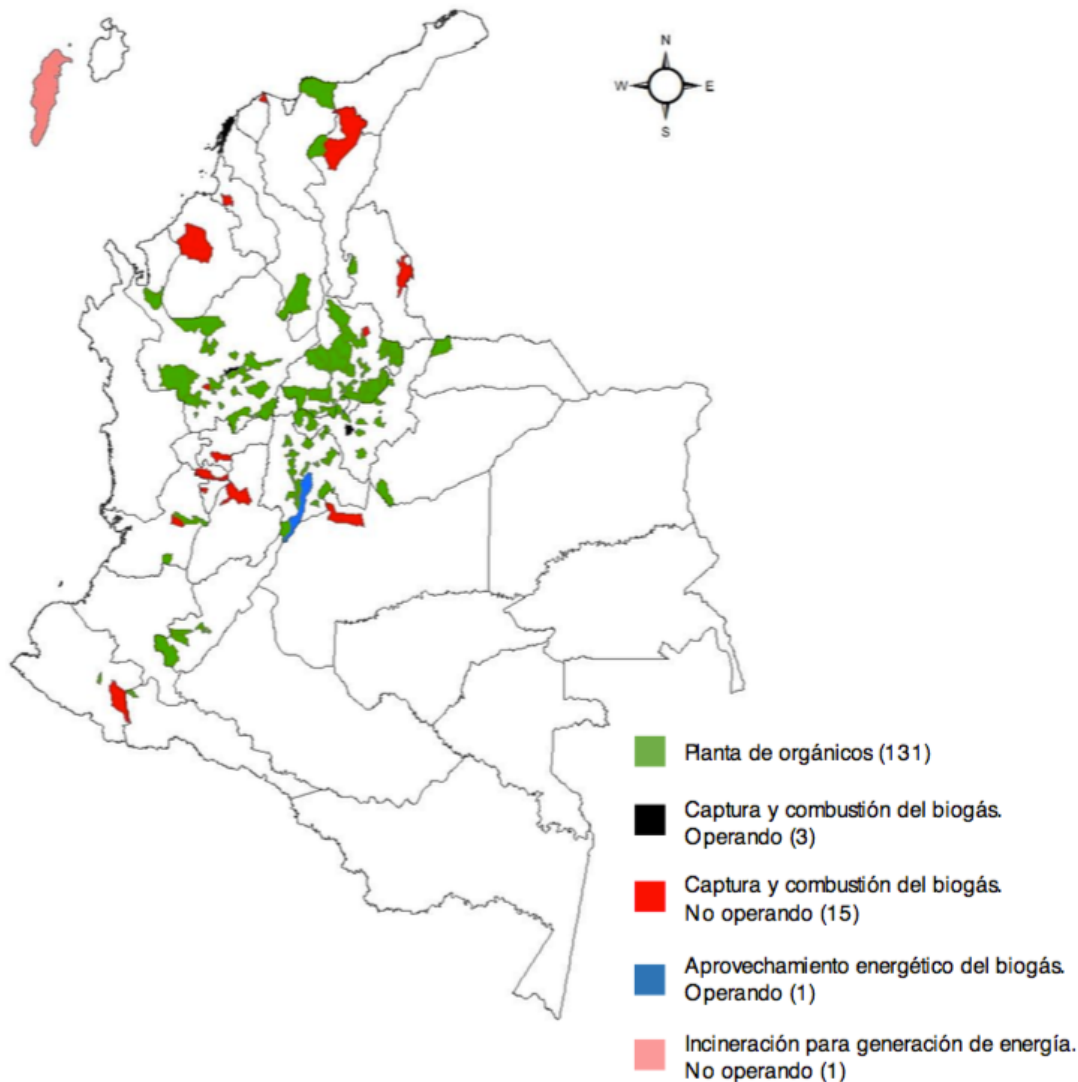
De esta manera, los altos costos de las técnicas estudiadas por el DNP y la falta de internalización y formalización de los costos totales asociados al aprovechamiento existente de RSU en Colombia, incluyendo costos ambientales y de salud, como también los beneficios por el aumento de la vida útil de productos en vez de ser enterrados, se consolidan como desafíos a superar para una utilización sostenible de estas dichas técnicas y nuevos procesos, que aportarían para cambiar el panorama actual colombiano, en donde, *“los tradicionales rellenos sanitarios, representan la disposición final del 83% de los residuos sólidos domiciliarios que se generan y solo el 17% es recuperado por recicladores para su reincorporación al ciclo productivo.”* (CONPES 3874, 2015)

Sin embargo y pese a los desafíos presentes, Colombia cuenta con infraestructura construida para el tratamiento de residuos y se ha buscado financiación con otras fuentes de recursos según lo dicho por el (CONPES 3874, 2015). En el Mapa 1 se observan los municipios donde están ubicadas dichas instalaciones. *“... En este se observa infraestructura ociosa para la captura y combustión del biogás (esta infraestructura no está operando en quince de dieciocho rellenos) y para la generación de energía a partir de residuos (planta de generación de energía a partir de residuos en San Andrés). Sin embargo, ha habido problemas en la operación asociada a sus altos costos. En el primer grupo, dado que la fuente de financiamiento eran los certificados de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, cuyas cotizaciones disminuyeron 97.5%% entre 2008 y 2015, los proyectos no son viables financieramente.”* (CONPES 3874, 2015)

Adicionalmente, el (DNP, 2016) complementa la información de la infraestructura colombiana y aporta cifras relevantes para la comprensión del panorama en infraestructura y aprovechamiento de RSU en Colombia, estas se presentan a continuación:

- La cobertura de recolección de residuos es del 97,4% en el área urbana y de 24,1% en las zonas rurales.
- Según la Superservicios, en el año 2014, 934 municipios disponían los residuos en sitios adecuados (rellenos sanitarios, plantas integrales y celdas de contingencia).
- 111 municipios disponen en botaderos a cielo abierto, principalmente en Bolívar (29), Chocó (25) y Magdalena (18).

**Mapa 1. Infraestructura de tratamiento y aprovechamiento de residuos en el país**

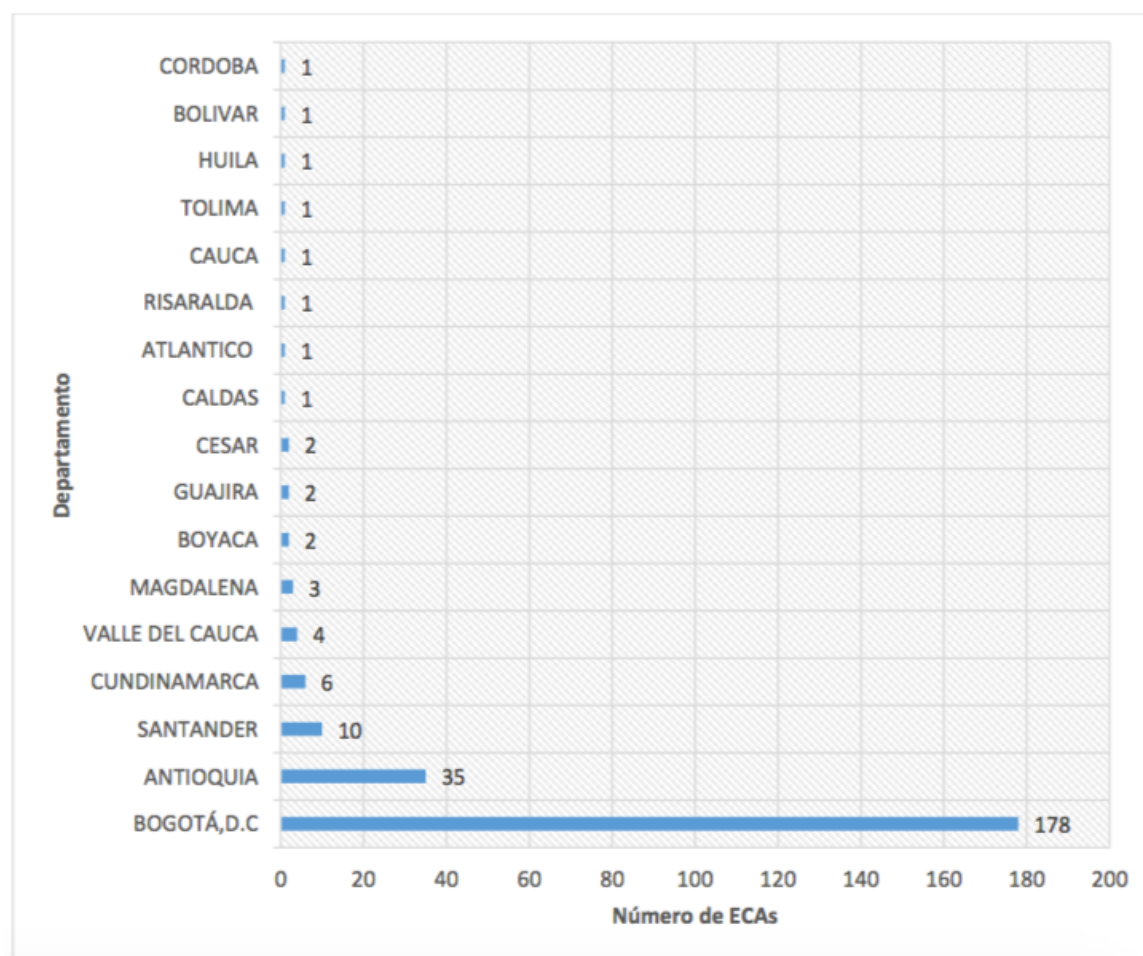


**Fuente:** DNP con base en información del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios.

- 46 municipios disponen en celdas transitorias, la cual ya no es una solución aceptada por la normatividad vigente.
- 5 municipios arrojan sus residuos a cuerpos de agua, 4 hacen enterramiento y 1 municipio quema sus basuras.
- 1.102 municipios disponen en 360 sitios.
- 803 municipios entregan en 62 sitios de disposición final regionales, los cuales representan el 91% de los residuos en todo el país.
- Se recicla y aprovecha cerca del 17% de los residuos que se generan.
- El sector residuos puede contribuir con 6% en la reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI).

Por su parte, Superservicios presenta en el año 2017 el Informe Nacional de aprovechamiento del año 2016, en el cual se presenta la información reportada en Sistema Único de Información (SUI) por parte de todas las personas prestadoras de recolección y transporte de residuos no aprovechables y las personas prestadoras de la actividad de aprovechamiento en el país. Dicho informe comprende todas las cifras relacionadas al número de Estaciones de Clasificación y Aprovechamiento (ECAs) por departamento, la capacidad de almacenamiento y el promedio de la capacidad operacional de estas por municipio, el número de toneladas eficientemente aprovechadas y el índice de aprovechamiento por año a nivel municipal y el tipo de material aprovechado en el país.

Gráfico 8. Número de ECAs reportadas en el año 2016 por departamento

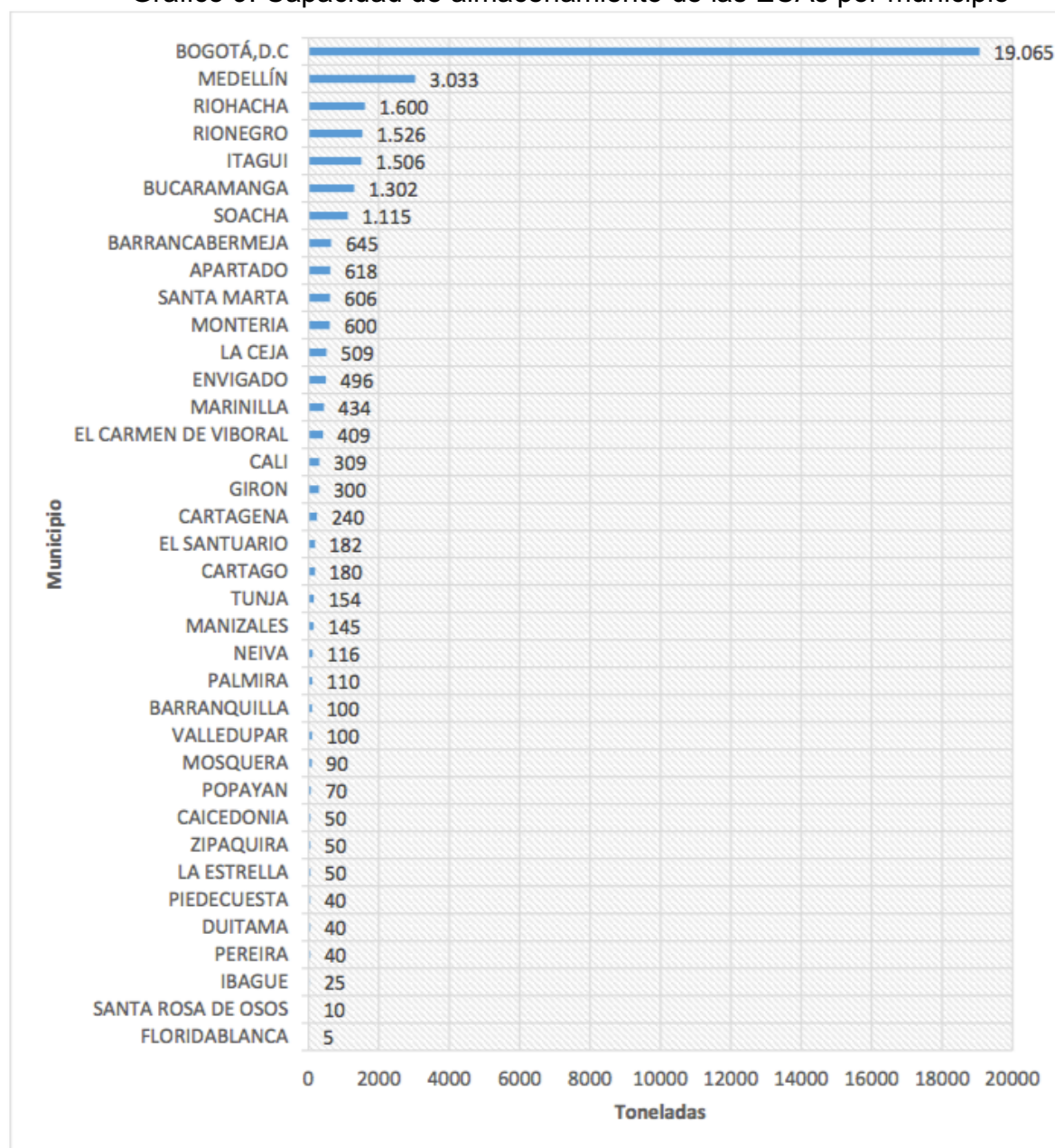


FUENTE: Sistema Único de Información

En el gráfico 8, se puede observar que las ECAs reportadas están principalmente distribuidas en Bogotá D.C (178), seguido por Antioquia (35) y Santander (10).

En el 2016, la capacidad de almacenamiento de residuos aprovechables total en Colombia de todas las ECAs registradas según Superservicios era de 35.871 toneladas, siendo Bogotá la ciudad que cuenta con mayor capacidad de almacenamiento ya que tiene reportado mayor número de ECAs, con un total de 19.065 toneladas de almacenamiento, seguido de Medellín con 3.033 toneladas. El municipio que menor capacidad tiene es Floridablanca con 5 toneladas, como se muestra en el Gráfico 9.

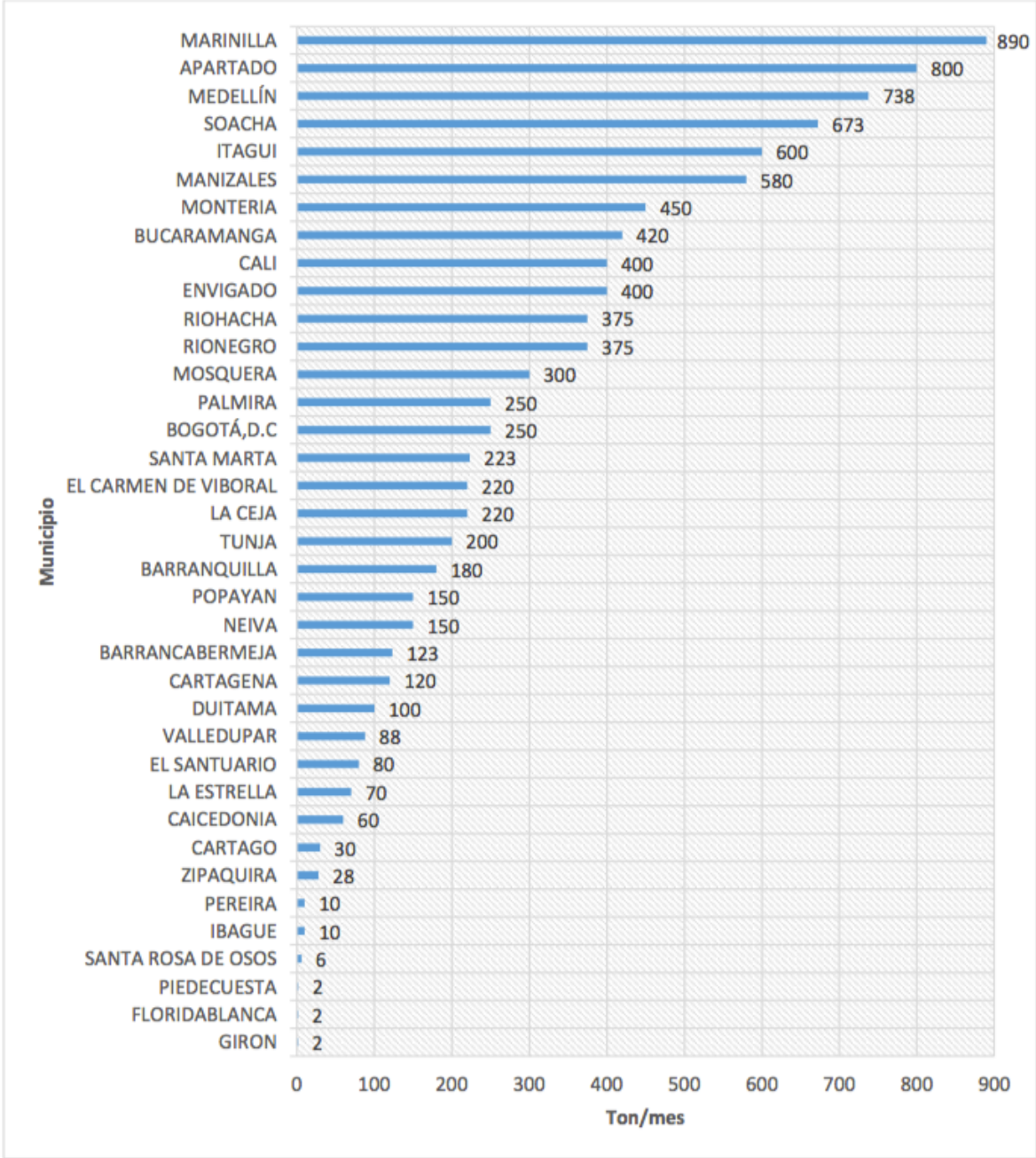
Gráfico 9. Capacidad de almacenamiento de las ECAs por municipio



FUENTE: Sistema Único de Información

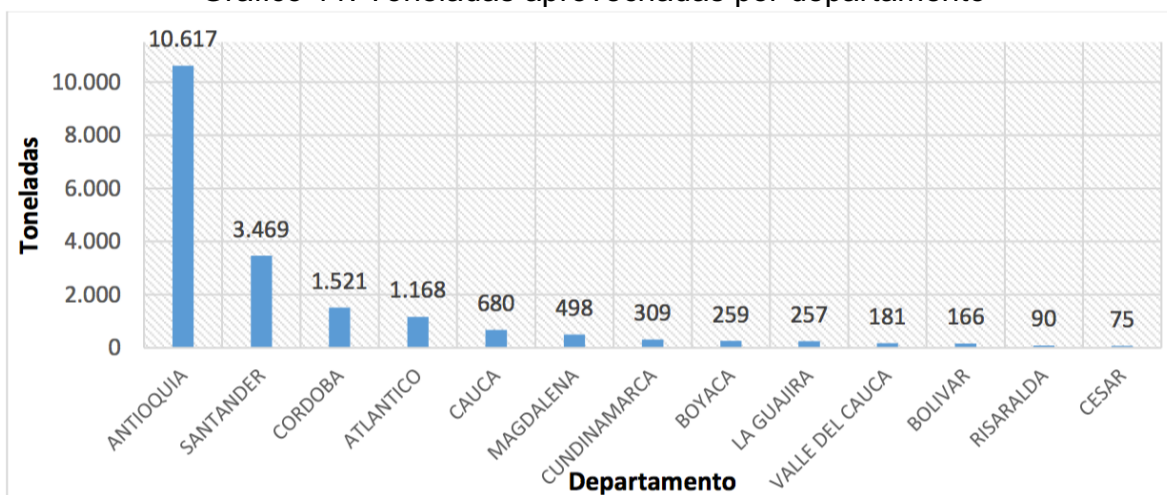
El Gráfico 10 muestra el promedio de la capacidad operacional mensual que tiene cada uno de los municipios, el cual es reportado en toneladas por mes. Marinilla, es quien cuenta con un mayor promedio de capacidad operacional con 890 ton/mes de operación, seguido por el municipio de Apartado con un promedio de 800 ton/mes y de Medellín con un promedio de 738 ton/mes. Los municipios que cuentan con menor capacidad operacional son Floridablanca y Girón en Santander, con un promedio de 1.5 toneladas mensuales.

Gráfico 10. Promedio de la capacidad operacional de las ECAs por municipio



FUENTE: Sistema Único de Información

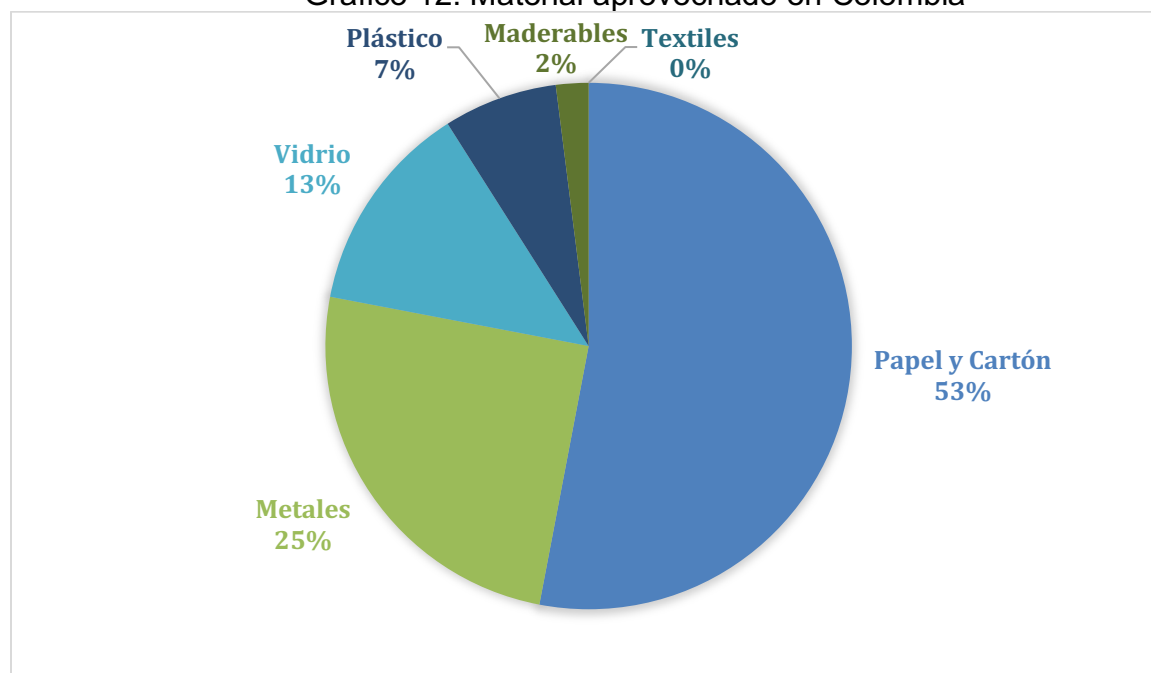
Gráfico 11. Toneladas aprovechadas por departamento



FUENTE: Sistema Único de Información

En el Gráfico 11 se excluye a Bogotá y se muestra la totalidad de toneladas reportadas por departamento durante el año 2016, en donde Antioquia fue el departamento que más toneladas reportó, con un 55%, seguido de Santander con un 18%; mientras que el departamento que menos aportó fue Cesar con un 0.08%.

Gráfico 12. Material aprovechado en Colombia



FUENTE: Adaptado SUI

A nivel nacional, en Colombia los materiales que más se aprovechan son el papel y el cartón, con un porcentaje de 53% correspondientes a 55.733 toneladas según la información de Superservicios, seguido de los metales con un 25% y del vidrio con un 13%. (Gráfico 12)

Según (Superservicios, 2017), el índice de aprovechamiento se define como el porcentaje calculado entre las toneladas de residuos producidos que dejan de ser dispuestos en un sitio de disposición final y las toneladas de residuos producidas totales en un periodo de tiempo.

Para calcular el índice de Colombia, *“... se realizó un análisis para cada uno de los municipios que reportaron toneladas aprovechadas durante el 2016 y las toneladas reportadas para los sitios de disposición final en el país a partir de abril del 2016”* (Superservicios, 2017). Los datos recolectados, se utilizaron en el cálculo del índice de aprovechamiento como se observa en el Anexo 1 por municipio, en la cual se observa que, a pesar de que Bogotá es el área de prestación que mayores toneladas genera, tiene un índice de aprovechamiento de 3,5 %; mientras que Carmen de Carupa posee un índice de 38,1%, lo cual indica que aprovecha casi la mitad de los residuos que genera. Cartagena y Soacha son las ciudades que tienen el menor índice de aprovechamiento con un 0,04% y 0.05% respectivamente. De igual manera se calcula el índice general para Colombia dando como resultado un 1.8%.

Por su parte (Eurostat, 2017), reporta que, en Europa, alrededor de 2 320 millones de toneladas de residuos fueron tratadas; esto incluye el tratamiento de residuos importados en la UE, por lo que las cantidades notificadas no se pueden comparar directamente con las referidas a la generación de residuos.

Aproximadamente el 47,4% de los RSU tratados en Europa en 2014 fueron sometidos a procesos de eliminación distintas a la incineración. Un 36,2% más de los residuos tratados en Europa en 2014 se envió a operaciones de valorización distintas de la valorización energética y el relleno. Alrededor de un 10,2% de RSU tuvieron una disposición final en rellenos, la parte restante se envió a incineración, tanto con valorización energética (4,7%) como sin ella (1,5%). Según Eurostat, *“... Entre los Estados miembros de la UE se observan diferencias significativas en cuanto al uso que hacen de estos diferentes métodos de tratamiento. Por ejemplo, algunos Estados miembros presentaron tasas de reciclado muy elevadas (Italia y Bélgica), mientras que otros favorecieron el tratamiento en vertederos (Bulgaria, Rumanía, Grecia, Suecia y Finlandia).”*

En el Anexo 2 se muestra la evolución del tratamiento de los residuos en Europa para las principales categorías de tratamiento durante el período comprendido entre 2004 y 2014. La cantidad de residuos tratados por eliminación en 2014 fue un 1,7% inferior a la de 2004; su porcentaje en el tratamiento de residuos total disminuyó del 54,6% al 48,9%. La cantidad de residuos valorizados, en otras palabras, incinerados con valorización energética, reciclados o utilizados para relleno aumentó en un 23,4%, pasando de 960 millones de toneladas en 2004 a 1185 millones de toneladas en 2014; por consiguiente, el porcentaje de valorización en el tratamiento total de residuos pasó del 45,4% en 2004 al 51,1% en 2014.

En materia de Waste to Energy (WtE), el Concilio Mundial de Energía en el año 2016, expresó que tratar los residuos con diversas tecnologías Waste to Energy, es una opción viable para la disposición de RSU y a su vez generar energía. Adicionalmente, expresó que hay muchos factores que pueden influenciar la selección de una tecnología y cada región tendrá que evaluar apropiadamente su contexto específico para implementar la solución más razonable.

No obstante, las cifras del mercado mundial de WtE, revelan que existe un notable crecimiento en la aplicación de sus tecnologías y en relación con esto, se registró que para el año 2013 el mercado WtE estaba valorado en \$25.32 billones de dólares, lo que representó un crecimiento de 5.5% respecto al año anterior. Las tecnologías basadas en conversión térmica lideran el mercado y representan el 88.2% de los ingresos totales del mercado WtE en 2013. Por su lado, las tecnologías biológicas WtE experimentarán un crecimiento más rápido que el promedio de crecimiento de 9.7% por año, en cuanto nuevas tecnologías como la Digestión Anaerobia (DA), se convierten en opciones comercialmente viables y penetran el mercado.

Se espera que el mercado continúe creciendo de manera estable hasta 2023, en ese momento, se estima que la valoración del mercado será de \$40 billones de dólares. Actualmente, Europa es el mercado más grande y sofisticado para tecnologías WtE, en 2013 contaba con 47.6% de los ingresos totales en el mercado mundial. El mercado asiático y pacífico está dominado por Japón, en el cual aproximadamente el 60% de los RSU son enviados a incineración. Sin embargo, el mercado de más rápido crecimiento ha tomado lugar en China, el cual tiene actualmente más del doble de su capacidad WtE que en el año 2011.

Lo mencionado anteriormente y la necesidad de incrementar la contribución de energía renovable y reducir la emisión de gases invernadero, junto al aumento de la conciencia ambiental para proteger el medio ambiente de contaminación y practicas insostenibles tales como los vertederos, tendrán un impacto positivo en el desarrollo del mercado WtE y abrirán el camino para que los gobiernos a nivel mundial enfoquen su atención en este tipo de aprovechamiento que cuenta dentro de sus principales aplicaciones, la producción de electricidad, generación de calor, generación de energía y calor y combustibles para vehículos.

De acuerdo con el propósito principal del capítulo mencionado en la primera parte de este y con el objetivo de evaluar aplicaciones WtE reales en Colombia, se realizó una revisión bibliográfica exhaustiva relacionada con el aprovechamiento de RSU y la producción de energía eléctrica, una de las aplicaciones del WtE. Las palabras claves utilizadas fueron: Energy recovery, Life Cycle Assessment (LCA), Municipal Solid Waste (MSW), Waste management, Waste-to-Energy (WtE), se consultaron dos principales bases de datos electrónicas: Science Direct y SCOPUS, arrojando como resultado total de búsqueda 4.069 artículos.

Se estableció un primer filtro de búsqueda, por año de publicación, tomando en cuenta únicamente artículos publicados del año 2017 en adelante y únicamente artículos de

investigación, debido a que se pretende consolidar información pertinente y actualizada acerca del tema de estudio, dando como resultado un total de 389 artículos. Un segundo filtro fue aplicado, tomando en cuenta la cercanía de conceptos en el título del artículo con las palabras claves establecidas, buscando así aumentar la relación existente entre el artículo y el propósito de este estudio, 50 artículos fueron el resultado de aplicar el segundo filtro.

El tercer filtro consistió en una lectura del resumen por CSV de cada artículo, dando como resultado 20 artículos los cuales fueron leídos en su totalidad, para finalmente aplicar un cuarto filtro, el cuál consistió en seleccionar aquellos artículos que expusieran aplicaciones reales en un contexto y lugar determinado, adicionalmente que también se abordaran integraciones entre dos o más tecnologías WtE, el número final de artículos fue cinco, con los cuales se pretende determinar las aplicaciones WtE actuales y pertinentes, de procesos y tecnologías para la producción de energía eléctrica y aprovechamiento de RSU que puedan considerarse para ser aplicadas en Colombia.

De la revisión comparativa entre estos cinco artículos, se extrajeron las alternativas WtE más apropiadas para evaluarse en el contexto colombiano, los principales criterios con los cuáles se compararon los artículos fueron: Título, autor, año, tecnologías WtE y enfoque, en la Tabla 4 se puede observar la descripción y comparación de los artículos seleccionados.

Según la revisión, el aporte realizado por Fernández J.M., Grindlay A.L., Serrano F., Rodríguez M.I. y Zamorano M. (2017) *Economic and environmental review of Waste-to-Energy systems formunicipal solid waste management in medium and small municipalities*, será adaptado en el siguiente capítulo de este proyecto, como herramienta para el análisis económico por medio del indicador económico VPN y un posterior análisis de sensibilidad, adicionalmente, para aterrizar la factibilidad de las aplicaciones WtE propuestas en dicho aporte, en el panorama colombiano. La selección de este artículo se basó principalmente en que, a diferencia de los otros cuatro artículos revisados (Matriz 1), este artículo aborda tres principales enfoques al momento de evaluar alternativas WtE, desarrolla el enfoque económico, técnico y territorial, lo que a consideración propia le da mayor relevancia al aporte y junto con un balance de masa realizado para cada una de las cinco alternativas propuestas, brinda la posibilidad de desarrollar un análisis cuantitativo y cualitativo de la factibilidad en la aplicación de nuevas alternativas WtE a los RSU en Colombia. Finalmente, el artículo seleccionado, abarca las principales tecnologías WtE disponibles en el mercado actual (Concilio Mundial de Energía, 2016) y adicionalmente evalúa no sólo la valorización energética de los RSU, si no también la producción de subproductos como los combustibles sólidos recuperados.

Tabla 4. Revisión Comparativa Artículos Seleccionados

| TITULO                                                                                                                                          | AUTOR(ES)                                                                                                                                                                                  | AÑO  | TECNOLOGÍAS WTE                                                                                                                                                                                                                                                         | ENFOQUE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Municipal solid waste as a valuable renewable energy resource: a worldwide opportunity of energy recovery by using Waste-To-Energy Technologies | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Diego Moya</li> <li>- Clay Aldás</li> <li>- Germánico López</li> <li>- Prasad Kaparajuc</li> </ul>                                                | 2017 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Incineración</li> <li>- Compostaje</li> <li>- Reciclaje</li> </ul>                                                                                                                                                             | Este estudio evalúa las diferentes tecnologías WtE desarrolladas a la fecha. Se divide en cuatro grupos: Tratamiento Biológico, Tratamiento Térmico, Vertederos con utilización de gas y biorefinerías, adicionalmente se estudian algunos sistemas integrados de tecnologías.                                                                                                      |
| Economic and environmental review of Waste-to-Energy systems for municipal solid waste management in medium and small municipalities            | <ul style="list-style-type: none"> <li>- J.M. Fernández González</li> <li>- A.L. Grindlay</li> <li>- F. Serrano Bernardo</li> <li>- M.I. Rodríguez Rojas</li> <li>- M. Zamorano</li> </ul> | 2017 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Digestión Anaerobia</li> <li>- Gasificación</li> <li>- Incineración con recuperación de energía</li> <li>- Vertederos</li> <li>- Vertederos con gasificación</li> <li>- Vertederos con cenizas</li> <li>- Pirolisis</li> </ul> | Este artículo analiza los costos económicos y ambientales de diferentes tecnologías WtE, en un área que comprende 13 municipios de España. Se analiza la digestión anaerobia, la producción de combustibles sólidos recuperados y se comparan con el tratamiento mecánico biológico actual, en el cual el rechazo termina en vertederos e incineración con recuperación de energía. |

FUENTE: Elaboración Propia

Tabla 4. Revisión Comparativa Artículos Seleccionados (Continuación)

| TITULO                                                                                                                               | AUTOR(ES)                                                                                           | AÑO  | TECNOLOGÍAS WTE                      | ENFOQUE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Integrated processes of anaerobic digestion and pyrolysis for higher bioenergy recovery from lignocellulosic biomass: A brief review | - Qunjie Feng,<br>Yunqin Lin                                                                        | 2017 | - Digestión Anaerobia<br>- Pirolisis | Este artículo revisa brevemente el desarrollo reciente y la factibilidad de procesos integrados. Se sugiere que la integración entre pirolisis y digestión anaerobia abrirá nuevos caminos interesantes para combinar procesos biológicos y termoquímicos para obtener una recuperación de bioenergía más alta desde la lignocelulosa.     |
| Improving waste to energy rate by promoting an integrated municipal solid-waste management system                                    | - Lu Suna<br>- Minoru Fujii -<br>Tomohiro<br>Tasakia<br>- Huijuan<br>Dongc<br>- Satoshi<br>Ohnishid | 2018 | - Incineración<br>- Fermentación     | Este estudio propone cuatro opciones eficientes para el manejo de residuos, através de la integración de tecnologías WtE y una simbiosis urbana. La metrópolis de Tokio fue seleccionada como caso estudio y los costos y beneficios de la reducción de gases invernadero, la recuperación de energía fueron cuantitativamente calculados. |
| Enhancing biomethane production by integrating pyrolysis and anaerobic digestion processes                                           | - Chaudhary<br>Awais Salman<br>- Sebastian<br>Schwede<br>- Eva Thorin<br>- Jinyue Yan               | 2017 | - Digestión Anaerobia<br>- Pirolisis | Este estudio propone el uso de una nueva configuración de proceso que empareja la digestión anaerobia con la pirolisis y genera un mejoramiento en la eficiencia general del sistema de un 12% en comparación con el sistema actual.                                                                                                       |

FUENTE: Elaboración Propia

## 5. EVALUACIÓN ECONÓMICA LAS OPCIONES DE APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO WASTE TO ENERGY EN EL CONTEXTO COLOMBIANO

En este capítulo se adaptará el análisis económico desarrollado por Fernández J.M., Grindlay A.L., Serrano F., Rodríguez M.I. y Zamorano M. (2017) y aplicado a cinco alternativas o escenarios propuestos para el tratamiento y valorización energética de RSU y subproductos de estos, la provincia de Granada (España) fue el área de estudio en la cual fue desarrollado el análisis. En el artículo los autores se refieren a una serie de desafíos para la implementación de nuevas tecnologías WtE, relacionados con los costos de las mismas, acceso a un sistema de manejo de residuos de calidad, dichos desafíos son los mismos desafíos que enfrenta Colombia, tal como se puede observar en lo mencionado en el capítulo anterior *“... los altos costos de las técnicas estudiadas por el DNP y la falta de internalización y formalización de los costos totales asociados al aprovechamiento existente de RSU en Colombia, incluyendo costos ambientales y de salud, como también los beneficios por el aumento de la vida útil de productos en vez de ser enterrados, se consolidan como desafíos a superar para una utilización sostenible de estas dichas técnicas y nuevos procesos”*.

Considerando los desafíos expresados, se pretende realizar una evaluación económica novedosa que tome en cuenta los costos asociados a las tecnologías WtE disponibles y la factibilidad para aplicarlas en Colombia en un horizonte de 20 años a partir de la fecha de la investigación (2018), mediante el cálculo de la utilidad de cada alternativa (Ratio), trayendo los costos e ingresos proyectados a un Valor Presente Neto (VPN) para poder ser luego operados y hallar la utilidad requerida.

En su trabajo, Fernández J.M., Grindlay A.L., Serrano F., Rodríguez M.I. y Zamorano M. (2017) proponen cinco alternativas diseñadas como A, B, C, D y E, representando las tecnologías disponibles actualmente en el mercado y basadas en la combinación de procesos unitarios, adicionalmente, se incluye en el estudio la alternativa 0, la cual es la situación actual de aprovechamiento de recursos en el área de estudio.

A continuación, en la Tabla 5, se representan las tecnologías WtE involucradas en el análisis económico, así como los subproductos resultantes del tratamiento de RSU por medio de las alternativas propuestas, dichas tecnologías y subproductos conformarán las alternativas descritas en la Tabla 6, la cual ofrece las características de cada alternativa estudiada. Las alternativas 0, A, B y C incluyen un tratamiento mecánico biológico para los RSU, incluyendo la recuperación de los materiales reciclables, tales como papel, vidrio, metal y plástico y el tratamiento biológico necesario para estabilizar el material orgánico biodegradable bajo condiciones aeróbicas o anaeróbicas. Para las condiciones D y E, la recuperación mecánica del material reciclable es incluido (principalmente papel, cartón, metales, vidrios y plástico). Con relación a la obtención de energía desde los RSU, como en el caso de la alternativa B, la fracción orgánica fue biometanizada, mientras que para las alternativas C, D y E se usaron procesos termoquímicos. La desgasificación del rechazo en los vertederos fue aplicada en A, B y C. Finalmente, la alternativa 0, sin recuperación de energía como se había nombrado

anteriormente, consiste en un tratamiento de separación mecánico biológico y la disposición final del producto bioestabilizado en los vertederos.

Tabla 5. Denominación de los procesos

| Procesos (i)                             | Denominación |
|------------------------------------------|--------------|
| Pretratamiento o tratamiento mecánico    | TM           |
| Tratamiento Biológico                    | TB           |
| Digestión Anaerobia                      | DA           |
| Combustible Sólido Recuperado*           | CSR          |
| Gasificación                             | GF           |
| Incineración con recuperación de energía | I-RE         |
| Vertedero                                | VT           |
| Vertedero con gasificación               | VT-GF        |
| Vertedero con recuperación de cenizas    | VT-C         |

FUENTE: Adaptado de J.M., Grindlay A.L., Serrano F., Rodríguez M.I. y Zamorano M. (2017)

\* Subproducto resultado de la aplicación de las tecnologías WtE utilizadas.

Tabla 6. Definición de las alternativas estudiadas

| Alternativa | Características                     |                  |             | Procesos        |
|-------------|-------------------------------------|------------------|-------------|-----------------|
|             | Tratamiento antes de la eliminación | Tecnología WtE   | Eliminación |                 |
| 0           | TM y TB                             | Sin recuperación | VT          | TM+TB+VT        |
| A           | TM y TB                             | Sin recuperación | VT-GF       | TM+TB+VT-GF     |
| B           | TM y TB                             | DA               | VT-GF       | TM+TB+DA+VT-GF  |
| C           | TM y TB                             | CSR              | VT-GF       | TM+TB+CSR+VT-GF |
| D           | TM                                  | GF               | VT-C        | TM+GF+VT-C      |
| E           | TM                                  | I-RE             | VT-C        | TM+I-RE+VT-C    |

FUENTE: Adaptado de J.M., Grindlay A.L., Serrano F., Rodríguez M.I. y Zamorano M. (2017)

Cada una de las alternativas propuestas, son desarrolladas teniendo en cuenta un balance de masa entre las diferentes etapas de cada alternativa. Uno de los parámetros con los que se pretende evaluar las alternativas es la utilidad neta para cada alternativa, definida como la diferencia entre los costos e ingresos totales obtenidos de la producción de electricidad y la venta de subproductos (Ecuación 1). Los costos totales (CWM) e ingresos (RWM), son expresados en pesos colombianos por tonelada por año y son calculados como la suma de costos e ingresos individuales para cada proceso (i). En las Tablas 13 y 15 se muestra la adaptación de costos e ingresos respectivamente en Colombia.

$$RPC = C_{WM} - R_{WM} \quad (1)$$

$$RPC = \sum_{i=1}^{i=n} C_{WMi} - \sum_{i=1}^{i=m} R_{WMi} \quad (2)$$

La ecuación (2) considera el costo de cada uno de los procesos (i) que constituyen la alternativa y los ingresos generados de diferentes fuentes; la ecuación (3) usa coeficientes de costo para estructuras, administración y financiación. Estos coeficientes provienen de experiencia profesional y la consulta con directores de proyectos enfocados en la rama de estudio en este proyecto hecha en España por parte de los autores y adaptados al contexto colombiano debido a que no se dispone de esta información para Colombia.

$$C_{WM} = \frac{1}{G} \times \left[ (1 + \delta) \times (1 + \gamma + \omega) \times A + \beta \times I + \sum_{j=1}^{j=m} (N_j \times S_j) \right] \quad (3)$$

Para calcular los costos para cada proceso (i), se asumen los costos determinados por los autores basados en la información recolectada de diferentes firmas encargadas del aprovechamiento de RSU en España. Dichos costos están compuestos por los costos de inversión (I1), que a su vez son el resultado de los costos de amortización en terreno y obra civil (A1). Los costos operacionales y de equipo (I2) son considerados como costos amortizados de mantenimiento, administrativos y de recursos humanos por año (A2), en la Tabla 7 se pueden observar los costos de inversión I1 e I2 por proceso. Se asume una tasa de cambio de \$3542 pesos/euro (Banco de la República, 2018) para adaptar los costos de inversión en euros que son asumidos desde el artículo referencia, debido a que no existe información reportada para Colombia acerca de dichos costos de inversión.

Por su parte, los ingresos se calculan como las ventas de subproductos, subprocesos (VT-C) y la producción de electricidad, adicionalmente considerando otros fondos gubernamentales implícitos dentro de la investigación. Para la gasificación (GF) y la incineración (I-RE), la producción se tomó como producción de electricidad.

Tabla 7. Costos para cada proceso (i)

| PROCESO | TIERRA Y OBRA CIVIL (I1)<br>(Pesos) | PROCESOS Y EQUIPO DE<br>OPERACIÓN (I2) (Pesos) |
|---------|-------------------------------------|------------------------------------------------|
| TM      | \$9,350,880,000                     | \$14,403,383,610                               |
| TB      | \$1,062,600,000                     | \$7,190,260,000                                |
| DA      | \$1,062,600,000                     | \$7,615,300,000                                |
| CSR     | \$1,062,600,000                     | \$1,523,060,000                                |
| GF      | \$7,084,000,000                     | \$26,919,200,000                               |
| I-RE    | \$12,397,000,000                    | \$42,858,200,000                               |
| VT      | \$10,271,800,000                    | \$2,125,200,000                                |
| VT-GF   | \$10,271,800,000                    | \$6,375,600,000                                |
| VT-C    | \$3,187,800,000                     | \$637,560,000                                  |

FUENTE: Adaptado de J.M., Grindlay A.L., Serrano F., Rodríguez M.I. y Zamorano M. (2017)

$$R_{WM} = \frac{1}{G} \times \left[ \sum_{k=1}^{k=n} (RM_k \times P_k) + E \times EP + I_S \right] \quad (4)$$

En la ecuación (4) el ingreso es calculado tomando en cuenta la cantidad de materiales recuperados (RM) y su precio (P), la electricidad producida (E) y su precio (EP) y los ingresos de fuentes gubernamentales (IS).

Las cantidades de materiales recuperados son asumidos con base en la información reportada por (Superservicios, 2017) previamente descrita en el Capítulo 1. En la Tabla 8, se presentan los porcentajes de los materiales recuperados (RM) que se adaptan para el cálculo de los ingresos.

Tabla 8. Porcentaje Material Recuperado en Colombia

| MATERIALES/SUB PRODUCTOS | MATERIAL RECUPERADO (%) |
|--------------------------|-------------------------|
| Empaques Ligeros         | 7%                      |
| Papel/Cartón             | 53%                     |
| Vidrio                   | 13%                     |
| Metales Férricos         | 25%                     |
| Metales No Férricos      | 2%                      |
| TOTAL                    | 100%                    |

FUENTE: (Superservicios, 2017)

En la Tabla 9, se puede observar el resumen de las tarifas de venta para los materiales recuperados, subproductos y electricidad. La tarifa para la venta de material recuperado en Colombia se calcula con base en los lineamientos de la Resolución CRA 720 de 2015. De acuerdo con esta norma, la tarifa de aprovechamiento es el resultado de la suma del costo de recolección y transporte, y el costo de disposición final del municipio donde se está llevando a cabo la actividad de aprovechamiento. (CEMPRE, 2017)

El valor para la tarifa de venta que se tomó en cuenta en este estudio se calculó con base en la información reportada en el SUI para el mes de enero del 2018, en donde 1324 prestadores de servicio de recolección reportaron sus costos tanto de recolección de transporte y el costo de disposición final, dando como resultado un promedio para Colombia de \$134.297 pesos por tonelada. Este valor se asume para todos los tipos de material recuperado debido a que la tarifa de venta en Colombia no varía dependiendo el tipo de material, si no que obedece simplemente a los costos previamente nombrados, que son reportados mensualmente por los prestadores de servicio ante el Sistema Único de Información.

Tabla 9. Precio de venta materiales, subproductos y electricidad en Colombia

| MATERIALES/SUB PRODUCTOS           |                          | PRECIO    |
|------------------------------------|--------------------------|-----------|
| Materiales Recuperados (Pesos/Ton) | Empaques Ligeros         | \$134,297 |
|                                    | Papel/Cartón             | \$134,297 |
|                                    | Vidrio                   | \$134,297 |
|                                    | Metales Férricos         | \$134,297 |
|                                    | Metales No Férricos      | \$134,297 |
| Sub Productos (Pesos/Ton)          | Material Bioestabilizado | \$28,336  |
|                                    | CSR                      | \$88,550  |
| Electricidad (Pesos/kWh)           |                          | \$426.7   |

FUENTE: CEMPRE (2017)

Para el precio de venta de la electricidad producida, se tomó en cuenta la información reportada por CODENSA en el año 2017, según la cual la tarifa para la venta del kWh era de \$426.7 pesos, este valor se obtuvo de promedio la tarifa para estrato 1 y estrato 6. Para la venta de subproductos como el Material Bioestabilizado y el Combustible Sólido Recuperado (CSR), el precio de venta fue adaptado del artículo fuente, utilizando el valor determinado en euros y transformado con la tasa de cambio utilizada en esta investigación, la cual es de \$3542 pesos/euro.

Algunos de los parámetros utilizados en las ecuaciones (3) y (4) son descritos a continuación:

- **G**: Toneladas de residuos tratados por por año en las instalaciones (Ton/año). El valor tomado para el área de estudio fue de 97.905 ton/año. Este valor se asume, de acuerdo con el índice de aprovechamiento reportado por (Superservicios, 2017) en el SUI en el 2016. Adicionalmente, la información reportada en el CONPES 3874, revela que la distribución de los RSU en Colombia está compuesta en más del 60% por Materia Orgánica, seguida por “Otros” residuos aportando un 14.42%, el tipo de residuo que con menor contribución dentro de la composición de los RSU en Colombia es la madera con tan sólo 0.54%, en la Tabla 10 se presenta la distribución de los RSU en Colombia.
- $\delta$ ,  $\gamma$ ,  $\omega$  Estos son los coeficientes para estructuras, administración y financiación, expresados como porcentajes (%). Se espera que el costo actual sea incrementado por estos coeficientes. Los coeficientes son adoptados del desarrollo hecho por los autores en el texto, debido de nuevo a la ausencia de esta información en Colombia y toman los valores de 16%, 15-25% y 5% respectivamente.

Tabla 10. Distribución de los RSU en Colombia

| COMPONENTES      | PORCENTAJE (%) |
|------------------|----------------|
| Materia Orgánica | 61.54%         |
| Papel/Cartón     | 6.55%          |
| Vidrio           | 2.39%          |
| Textiles         | 2.74%          |
| Madera           | 0.54%          |
| Plástico         | 10.78%         |
| Metales          | 1.04%          |
| Otros            | 14.42%         |
| <b>TOTAL</b>     | <b>100.00%</b> |

FUENTE: (CONPES 3874, 2015)

- **A** Estos son los costos de amortización para el proceso (i) (Pesos por año), el cual es dado por la suma de los costos de amortización de terreno y obra civil (A1) y los de equipo para proceso y explotación (A2) en la ecuación (5).

$$A = A_1 + A_2 = \frac{I_1}{n_1} + \frac{I_2}{n_2} \quad (5)$$

- **I** Representa las inversiones hechas en las instalaciones para cada proceso (Pesos), las cuales pueden ser separadas en inversiones en terreno y obra civil (I1) y equipo para el procesamiento y explotación (I2), como se muestra en la ecuación (6) y previamente descritos en la Tabla 7.

$$I = I_1 + I_2 \quad (6)$$

- **n1, n2** Expresan la vida útil de las inversiones, ambas para obras civiles (n1) y para la maquinaria y equipo (n2), el valor en este estudio es de 20 años y fue adaptado del artículo fuente.
- **β** Es el coeficiente de mantenimiento y conservación para la maquinaria, expresada como un porcentaje (%). En vista de la información provista, esta toma un valor desde 3% hasta 8%, dependiendo el tipo de tratamiento: 8% para TM, VT y VT-GF; 6% para TB, DA, CSR y VT-C; 5% en el caso de GF y finalmente 3% para I-ER. No fue posible obtener este coeficiente para Colombia, por tal motivo se asume el coeficiente propuesto por los autores en el aporte realizado.
- **Nj** es el número de trabajadores para diferentes categorías (j). Tres categorías fueron consideradas; el número de trabajadores asignados a cada proceso es mostrado en la Tabla 11, el número de trabajadores por categoría son determinados dentro del modelo propuesto por los autores y es adoptado en esta investigación. La categoría 1 se considera como el supervisor de la planta y es

por esta razón que tan sólo se incluye un trabajador en esta categoría asignado al Tratamiento Mecánico que es común en todas las alternativas.

Para el posterior cálculo de los costos por empleado, se toma en cuenta la Escala Salarial propuesta por (Red Enlace Profesional, 2017), en la cual se establecen los niveles salariales de una persona en Colombia en relación a su nivel educativo, por esta razón, se determinó que el nivel académico para los empleados en la categoría 1 es Profesional con 1 a 3 años de experiencia, para la categoría 2 el nivel académico es tecnólogo con 1 a 3 años de experiencia y para la categoría 3 el nivel académico es técnico.

- **Sj** Este es el costo del salario por trabajador para la categoría (j) (pesos/año). Los costos de salario de las diferentes categorías de trabajadores fueron calculados con base en los rubros estipulados por el Código Sustantivo del Trabajo Colombiano, el cual señala que un empleador en Colombia debe asumir: El salario del empleado, un rubro de vacaciones (que representa el salario de 15 días hábiles por año), prima de servicios (representa 30 días de salario por año), cesantías (representa 30 días de salario por año), adicionalmente intereses sobre estas (que corresponden a 12% de las cesantías), el aporte para seguridad social (expresado en porcentajes del salario del empleado), distribuido a pensión (12%), salud (8.5%) y ARL (100%), finalmente aportes parafiscales (equivalente al 9% del salario). El cálculo del costo para cada categoría (j) es presentado en el Anexo 3.

Tabla 11. Categoría del personal y número de personal de acuerdo con el proceso

| CATEGORÍA   | PROCESO (NÚMERO DE PERSONAL) |    |    |     |    |      |    |       |      |
|-------------|------------------------------|----|----|-----|----|------|----|-------|------|
|             | TM                           | TB | DA | CSR | GF | I-RE | VT | VT-GF | VT-C |
| CATEGORÍA 1 | 1                            | 0  | 0  | 0   | 0  | 0    | 0  | 0     | 0    |
| CATEGORÍA 2 | 2                            | 0  | 1  | 1   | 1  | 1    | 1  | 1     | 0    |
| CATEGORÍA 3 | 14                           | 2  | 1  | 1   | 2  | 20   | 6  | 4     | 0    |

FUENTE: Adaptado de J.M., Grindlay A.L., Serrano F., Rodríguez M.I. y Zamorano M. (2017)

- **RM<sub>k</sub>** Las toneladas de subproductos y materiales (k) recuperadas anualmente (ton/año), se determinaron usando la ecuación (7).

$$RM_k = G \times \frac{C_k}{100} \times \frac{\alpha_k}{100} \quad (7)$$

- **C<sub>k</sub>** El porcentaje de cada material presente en el residuo, de acuerdo con la información mostrada en la Tabla 10.

- **$\alpha k$**  El porcentaje de recuperación de cada material en la planta, teniendo en cuenta un rendimiento mecánico global de 10.61%. La Tabla 8 muestra los porcentajes de recuperación para cada uno de los materiales.
- **$Pk$**  El precio de venta, en pesos por tonelada (pesos/ton), de subproductos y materiales recuperados ( $k$ ), se referencia la información en la Tabla 9.
- **$E$**  Energía producida (kWh), calculada de acuerdo a las ecuaciones (8)(11), con relación a la tecnología usada, esta energía será incluida como parte de los resultados en el siguiente capítulo.

Biometanización:

$$E_B = 0.28 \times G \times OM \times (CH_4)_p \times LHV_{CH_4} \times \eta_b \quad (8)$$

Gasificación:

$$E_G = 0.28 \times G \times R_f \times LHV_{RF} \times \eta_g \quad (9)$$

Incineración:

$$E_I = 0.28 \times G \times R_f \times LHV_{RF} \times \eta_i \quad (10)$$

Desgasificación en vertederos:

$$E_{LG} = 0.28 \times G \times R_{OM} \times (CH_4)_p \times LHV_{CH_4} \times \eta_{LG} \quad (11)$$

Otros de los valores utilizados en las ecuaciones (8) a (11), son adaptados del artículo seleccionado debido a que son parámetros constantes, para el caso de OM, ROM, EP e IS son determinados según la adaptación colombiana y son descritos en la Tabla 12.

Tabla 12. Conceptos para el cálculo de la producción de energía y subproductos

| <b>Término</b>                  | <b>Concepto</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0.28                            | Factor que se utiliza para convertir de kWh a Megajulios, se usa la tasa de conversión $1\text{MJ} = 0.28\text{kWh}$                                                                                                                                                                                            |
| OM                              | Porcentaje de materia orgánica presente en los RSU. Tabla 10                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Rf                              | Porcentaje de rechazo después del tratamiento mecánico (%). Determinado tomando en cuenta el balance de masa propuesto. (Para gasificación 72.51% y para incineración 89.39%)                                                                                                                                   |
| ROM                             | Porcentaje de materia orgánica presente en el rechazo después de el tratamiento mecánico biológico (%). Determinado tomando en cuenta el balance de masa propuesto.                                                                                                                                             |
| (CH <sub>4</sub> ) <sub>p</sub> | Ratio de generación de metano para fracción orgánica de los RSU (Nm <sup>3</sup> /t). Este valor es encontrado en los siguientes intervalos:<br>Biometanización $67.5 \leq (\text{CH}_4)_p \leq 122$ . Valor tomado: 115<br>Desgasificación en vertedero $25 \leq (\text{CH}_4)_p \leq 200$ . Valor tomado 150. |
| LHV <sub>CH<sub>4</sub></sub>   | El valor menor de calentamiento del metano, el valor tomado fue 37.2MJ/Nm <sup>3</sup>                                                                                                                                                                                                                          |
| LHVR <sub>f</sub>               | Valor de calentamiento del rechazo (MJ/t), el valor tomado fue 10.000 MJ/t para gasificación y 8.000 MJ/t para incineración.                                                                                                                                                                                    |
| η <sub>b</sub>                  | Tasa de transformación de gas en electricidad. Este valor sería η <sub>b</sub> = 0.29 para motores de combustión interna, sustrayendo el consumo propio de la planta                                                                                                                                            |
| η <sub>g</sub> , η <sub>i</sub> | Tasa de transformación de la gasificación e incineración respectivamente, los valores adoptados fueron η <sub>g</sub> = 0.23 y η <sub>i</sub> = 0.29, sustrayendo el consumo propio de la planta                                                                                                                |
| η <sub>LG</sub>                 | Tasa de transformación de gas en electricidad. Este valor sería η <sub>LG</sub> = 0.33 para motores de combustión interna, sustrayendo el consumo propio de la planta                                                                                                                                           |
| EP                              | Precio de venta de la electricidad (Peso/kWh) El valor considerado fue 426.7 pesos/kWh. (CODENSA, 2017)                                                                                                                                                                                                         |
| IS                              | Ingresos de financiación no fueron considerados porque actualmente Colombia no tiene una asistencia constante para la producción de electricidad con base en RSU.                                                                                                                                               |

FUENTE: Adaptado de J.M., Grindlay A.L., Serrano F., Rodríguez M.I. y Zamorano M. (2017)

## **6. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA EVALUACIÓN ECONÓMICA PARA EL CONTEXTO COLOMBIANO**

Según los resultados obtenidos al calcular los costos para cada proceso (i) (Tabla 13), se puede observar que para Colombia el proceso (i) que representa mayores costos es la incineración con recuperación de energía con un valor de \$60,266 pesos/ton, seguido por la gasificación que presenta costos de \$42,589 pesos/tonelada, estos valores se pueden explicar al revisar los altos costos de inversión y equipo asociados a estos. Por otro lado, el tratamiento mecánico a pesar de ser considerado como un pretratamiento, se ubica como el tercer tratamiento con costos más altos (\$41,173 pesos/tonelada), lo que promueve la importancia de generar la conciencia en la población de realizar separación desde la fuente, esto disminuiría los costos necesarios para realizar la separación de los RSU por medio del tratamiento mecánico.

Por otro lado, es importante resaltar que la digestión anaerobia hablando únicamente en términos de costos es una opción interesante para ser implementada, debido a su bajo costo \$11,267 pesos/tonelada, no obstante, es importante revisar las cifras de los ingresos obtenidos con esta tecnología y calcular la utilidad para poder consolidar este proceso como una potencial alternativa de aprovechamiento energético en Colombia.

El combustible sólido recuperado CSR, presenta el costo más bajo \$3,977 pesos/tonelada, lo que sugiere que la producción de este subproducto potencialmente podría ser una alternativa aplicada para el aprovechamiento de los RSU en Colombia, sin embargo, de la misma manera que la digestión anaerobia, será necesario revisar la utilidad de esta opción de aprovechamiento.

En términos de la disposición final de los RSU, la opción que presenta mayores costos \$26,625 pesos/toneladas, es la de vertedero con gasificación, esto podría ser evaluado y atribuir los altos costos de esta alternativa a los altos costos de amortización. El vertedero con cenizas debido a que no posee gastos asociados a mano de obra, sus bajos costos \$5,109 pesos/tonelada, lo consolidan como una opción importante para la disposición final de los RSU en Colombia.

Por otro lado, para calcular los ingresos obtenidos por producción de electricidad, por parte de la digestión anaerobia, gasificación, incineración con recuperación de energía y vertederos con gasificación, fue necesario calcular la producción de energía eléctrica proveniente de estos procesos, para esto se tuvo en cuenta todos los parámetros descritos en las ecuaciones (8) a (11), pero también la tarifa de venta del kWh en Colombia, de esta manera la producción de energía eléctrica se pudo expresar en términos de pesos por año, o en otras palabras, los ingresos potenciales de cada una de estas opciones de aprovechamiento. En la Tabla 14 se pueden observar los resultados obtenidos.

**Tabla 13. Costos anuales para cada proceso por toneladas procesadas**

| <b>PARAMETROS</b>            | <b>TM</b>        | <b>TB</b>       | <b>DA</b>       | <b>CSR</b>      | <b>GF</b>        | <b>I-RE</b>      | <b>VT</b>        | <b>VT-GF</b>     | <b>VT-C</b>     |
|------------------------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|
| $\delta$ (%)                 | 16%              | 16%             | 16%             | 16%             | 16%              | 16%              | 16%              | 16%              | 16%             |
| $\gamma$ (%)                 | 25%              | 15%             | 15%             | 20%             | 17%              | 16%              | 20%              | 17%              | 17%             |
| $\omega$ (%)                 | 5%               | 5%              | 5%              | 5%              | 5%               | 5%               | 5%               | 5%               | 5%              |
| I1 (Pesos)                   | \$9,350,880,000  | \$1,062,600,000 | \$1,062,600,000 | \$1,062,600,000 | \$7,084,000,000  | \$12,397,000,000 | \$10,271,800,000 | \$10,271,800,000 | \$3,187,800,000 |
| I2 (Pesos)                   | \$14,403,383,610 | \$7,190,260,000 | \$7,615,300,000 | \$1,523,060,000 | \$26,919,200,000 | \$42,858,200,000 | \$2,125,200,000  | \$6,375,600,000  | \$637,560,000   |
| n1, n2 (Años)                | 20               | 20              | 20              | 20              | 20               | 20               | 20               | 20               | 20              |
| A (Pesos/Año)                | \$1,187,713,181  | \$412,643,000   | \$433,895,000   | \$129,283,000   | \$1,700,160,000  | \$2,762,760,000  | \$619,850,000    | \$832,370,000    | \$191,268,000   |
| $\beta$                      | 8%               | 6%              | 6%              | 6%              | 5%               | 3%               | 8%               | 8%               | 6%              |
| Costo de Salario (Pesos/Año) | \$339,616,242    | \$33,483,262    | \$46,754,047    | \$46,754,047    | \$63,495,678     | \$364,845,036    | \$130,462,202    | \$96,978,940     | \$0             |
| CWM (Pesos/Ton)              | \$41,173         | \$11,267        | \$11,965        | \$3,977         | \$42,589         | \$60,266         | \$20,643         | \$26,625         | \$5,109         |

FUENTE: Adaptado para Colombia de J.M., Grindlay A.L., Serrano F., Rodríguez M.I. y Zamorano M. (2017)

Tabla 14. Producción de electricidad anual por proceso

| PROCESOS                                             | DA              | GF               | I-RE             | VT-GF            |
|------------------------------------------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| Conversión KWh                                       | 0.28            | 0.28             | 0.28             | 0.28             |
| OM                                                   | 0.6154          |                  |                  |                  |
| Rf                                                   |                 | 0.7251           | 0.8939           |                  |
| Rom                                                  |                 |                  |                  | 0.5148           |
| (CH <sub>4</sub> ) <sub>p</sub> (Nm <sup>3</sup> /t) | 115             |                  |                  | 150              |
| LHV <sub>ch4</sub> (MJ/Nm <sup>3</sup> )             | 37.2            |                  |                  | 37.2             |
| LHV <sub>rf</sub> (MJ/t)                             |                 | 10000            | 8000             |                  |
| η <sub>b</sub>                                       | 0.29            |                  |                  |                  |
| η <sub>g</sub>                                       |                 |                  | 0.29             |                  |
| η <sub>i</sub>                                       |                 | 0.23             |                  |                  |
| η <sub>LG</sub>                                      |                 |                  |                  | 0.33             |
| EP (\$/KWh)                                          | 426.7           | 426.7            | 426.7            | 426.7            |
| ELECTRICIDAD PRODUCIDA (KWh/Año)                     | 20.929.515      | 45.718.150       | 56.851.225       | 25.986.607       |
| POSIBLES INGRESOS (\$/Año)                           | \$8,930,624,227 | \$19,507,934,427 | \$24,258,417,606 | \$11,088,485,247 |

FUENTE: Elaboración propia

Inicialmente, se resalta los altos ingresos de la incineración con recuperación de energía, lo que tiene relación directa con la cantidad de electricidad producida por medio de esta opción y con el porcentaje de rechazo que después de la separación mecánica se re direcciona a la etapa de incineración con recuperación de energía.

En el caso de la digestión anaerobia a pesar que el mayor porcentaje de los RSU en Colombia es Materia Orgánica, no presenta una producción de electricidad elevada en comparación con las otras opciones, lo que se traduce en bajos ingresos comparados entre procesos.

Se puede observar que la integración del rechazo después del tratamiento mecánico o separación mecánica, influye drásticamente en la capacidad de producción de electricidad y finalmente, en la obtención de ingresos.

Es necesario, no obstante, que estos hallazgos sean validados con los costos de cada una de estos procesos y consolidar su real contribución y utilidad.

Los ingresos evaluados también están compuestos por la venta de subproductos y material recuperado, lo que hace necesario evaluar los ingresos de el tratamiento mecánico, el tratamiento biológico, la producción de combustible sólido recuperado y los ingresos internalizados de las disposiciones finales en vertedero y vertedero con recuperación de cenizas.

La Tabla 14, es la adaptación para Colombia de la suma de todos los ingresos obtenidos para todas las opciones de aprovechamiento, incluyendo los ingresos previamente descritos por producción de electricidad, junto con los ingresos de recuperación de material, ingresos por subproductos e ingresos internalizados en las procesos donde haya lugar (procesos de disposición final, vertederos). Para la revisión de los resultados, se presentan los ingresos en pesos por tonelada (\$/ton) y en pesos por año (\$/año).

Se observa, que al totalizar todos los ingresos obtenidos por los procesos, el proceso con mayores ingresos es la incineración con recuperación de energía, los cuales están compuestos por la venta de materiales férricos recuperados y la producción de electricidad. La gasificación a pesar de que sólo produce ingresos por la producción de electricidad se ubica en la segunda posición de ingresos.

Vale la pena resaltar que a pesar que la digestión anaerobia y la producción de combustible sólido recuperado producen ingresos por venta de subproductos y producción de electricidad, la diferencia entre la cantidad total de ingresos de estos y la de la incineración y gasificación es significativa, lo que valida la idea que la inclusión de el rechazo después del tratamiento mecánico en la etapa de gasificación e incineración, incrementa los ingresos percibidos por estas, valorizando el rechazo dentro de un sistema integrado para el aprovechamiento energético.

Finalmente, el análisis a los ingresos de disposición final y la valorización económica de estos, consolida que tan sólo el vertedero con gasificación percibe ingresos por la producción de electricidad y esto debido a la inclusión del rechazo después de el tratamiento biológico en el proceso de gasificación que se lleva a cabo en el vertedero, lo que aumenta la capacidad de este proceso para percibir ingresos. Los ingresos anuales para vertedero y vertedero con recuperación de cenizas son despreciables, únicamente es cuantificable los posibles ingresos por toneladas, pero que, con base en el balance de masa, la cantidad de residuos que termina siendo dispuesto finalmente en estas opciones es insignificante, lo que hace que estas dos opciones no contribuyan con ingresos al sistema integrado de aprovechamiento.

Con el propósito de evaluar la viabilidad de alternativas de aprovechamiento energético con base en RSU, se plante el análisis económico de cada alternativa, totalizando los costos e ingresos de cada proceso involucrado en la alternativa y calculando la utilidad de cada alternativa, esto en relación con lo propuesta en las ecuaciones (1) y (2). En la Tabla 15 se consolidaron los costos para cada una de las seis alternativas (0, A, B, C, D y E) y en la Tabla 16 se consolidan los ingresos para las mismas alternativas, finalmente en la Tabla 17 se presentan los resultados del calculo de la utilidad para las alternativas propuestas.

Tabla 15. Ingresos por cada proceso por tonelada y por año

| RUBROS                             |                         | TM               | TB            | DA              | CSR             | GF               | I-RE             | VT    | VT-GF            | VT-C      |
|------------------------------------|-------------------------|------------------|---------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|-------|------------------|-----------|
| Recuperación de Material (Ton/Año) | Empaque Ligero          | 6853.35          |               |                 |                 |                  |                  |       |                  |           |
|                                    | Papel/Cartón            | 51889.65         |               |                 |                 |                  |                  |       |                  |           |
|                                    | Vidrio                  | 12727.65         |               |                 |                 |                  |                  |       |                  |           |
|                                    | Metales Férricos        | 24476.25         |               |                 |                 |                  |                  |       |                  |           |
|                                    | Metales No Férricos     | 1958.1           |               |                 |                 |                  |                  |       |                  |           |
| Material Bioestabilizado           | %                       |                  | 20.60%        | 12.00%          |                 |                  |                  |       |                  |           |
|                                    | Ton/Año                 |                  | 20168.43      | 11748.6         |                 |                  |                  |       |                  |           |
| Densificación                      | %                       |                  |               |                 | 23.36%          |                  |                  |       |                  |           |
|                                    | Ton/Año                 |                  |               |                 | 22870.608       |                  |                  |       |                  |           |
| Ganancias (\$/Año)                 | Empaque Ligero          | \$920,384,345    |               |                 |                 |                  |                  |       |                  |           |
|                                    | Papel/Cartón            | \$6,968,624,326  |               |                 |                 |                  |                  |       |                  |           |
|                                    | Vidrio                  | \$1,709,285,212  |               |                 |                 |                  |                  |       |                  |           |
|                                    | Metales Férricos        | \$3,287,086,946  |               |                 |                 |                  | \$31,500         |       |                  |           |
|                                    | Metales No Férricos     | \$262,966,956    |               |                 |                 |                  |                  |       |                  |           |
|                                    | Materia Bioestabilizada |                  | \$571,492,632 | \$332,908,330   |                 |                  |                  |       |                  |           |
|                                    | CSR                     |                  |               |                 | \$2,025,192,338 |                  |                  |       |                  |           |
|                                    | TOTAL                   | \$13,148,347,785 | \$571,492,632 | \$332,908,330   | \$2,025,192,338 | \$0              | \$31,500         | \$0   | \$0              | \$0       |
| Ganancias por energía (\$/Año)     |                         |                  |               | \$8,930,624,227 |                 | \$19,507,934,427 | \$24,258,417,606 |       | \$11,088,485,247 |           |
| RWM                                | \$/Año                  | \$13,148,347,785 | \$571,492,632 | \$9,263,532,557 | \$2,025,192,338 | \$19,507,934,427 | \$24,258,449,106 | \$0   | \$11,088,485,247 | \$0       |
|                                    | \$/Ton                  | \$134,883        | \$6,423.31    | \$95,203.65     | \$21,271.37     | \$199,839.80     | \$248,361.48     | \$586 | \$113,843.69     | \$586.091 |

FUENTE: Adaptado para Colombia de J.M., Grindlay A.L., Serrano F., Rodríguez M.I. y Zamorano M. (2017)

Tabla 16. Costos por alternativa

| ALTERNATIVA | COSTOS (PESOS/TON) |          |          |          |           |           |           |          |          |           |
|-------------|--------------------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|
|             | TM                 | TB       | DA       | CSR      | GF        | I-RE      | VT        | VT-GF    | VT-C     | TOTAL     |
| 0           | \$338,952          | \$92,751 | \$0      | \$0      | \$0       | \$0       | \$169,938 | \$0      | \$0      | \$601,641 |
| A           | \$338,952          | \$92,751 | \$0      | \$0      | \$0       | \$0       | \$0       | \$42,060 | \$0      | \$473,763 |
| B           | \$338,952          | \$92,751 | \$98,499 | \$0      | \$0       | \$0       | \$0       | \$42,060 | \$0      | \$572,262 |
| C           | \$338,952          | \$92,751 | \$0      | \$32,739 | \$0       | \$0       | \$0       | \$42,060 | \$0      | \$506,503 |
| D           | \$338,952          | \$0      | \$0      | \$0      | \$350,614 | \$0       | \$0       | \$0      | \$40,502 | \$730,069 |
| E           | \$338,952          | \$0      | \$0      | \$0      | \$0       | \$496,132 | \$0       | \$0      | \$40,502 | \$875,586 |

FUENTE: Adaptación para Colombia de J.M., Grindlay A.L., Serrano F., Rodríguez M.I. y Zamorano M. (2017)

Los costos involucrados en cada alternativa están directamente relacionados con los costos de los procesos que hacen parte de la alternativa, tal cómo se expresa en la Tabla 6. En las celdas donde se intersectan los procesos con las alternativas y el valor es cero, se puede interpretar como la ausencia de dicho proceso en dicha alternativa.

Como propuesta de valor en esta investigación las cifras registradas en la Tabla 16 para los costos de cada proceso, corresponden al cálculo del valor presente neto, de los costos para cada proceso proyectados a 20 años, que, según el artículo referenciado, es la vida útil de las tecnologías desarrolladas. El valor de la TIR usada en los cálculos fue adoptada del estudio hecho por (Funcener, 2018) la cual es de un 14.4% para proyectos de energías renovables. La aplicación del VPN permitirá entonces, considerar no sólo los costos bajo condiciones actuales, si no también, tener una aproximación económica que considere los costos durante la vida útil de la tecnología.

Tabla 17. Ingresos por cada alternativa

| ALTERNATIVA | INGRESOS (PESOS/TON) |             |              |             |              |              |     |              |      |              |
|-------------|----------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|--------------|-----|--------------|------|--------------|
|             | TM                   | TB          | DA           | CSR         | GF           | I-RE         | VT  | VT-GF        | VT-C | TOTAL        |
| 0           | \$32,331,602         | \$1,539,673 | \$0          | \$0         | \$0          | \$0          | \$0 | \$0          | \$0  | \$33,871,274 |
| A           | \$32,331,602         | \$1,539,673 | \$0          | \$0         | \$0          | \$0          | \$0 | \$27,288,438 | \$0  | \$61,159,712 |
| B           | \$32,331,602         | \$1,539,673 | \$22,820,404 | \$0         | \$0          | \$0          | \$0 | \$27,288,438 | \$0  | \$83,980,116 |
| C           | \$32,331,602         | \$1,539,673 | \$0          | \$5,098,767 | \$0          | \$0          | \$0 | \$27,288,438 | \$0  | \$66,258,480 |
| D           | \$32,331,602         | \$0         | \$0          | \$0         | \$47,901,785 | \$0          | \$0 | \$0          | \$0  | \$80,233,387 |
| E           | \$32,331,602         | \$0         | \$0          | \$0         | \$0          | \$59,532,476 | \$0 | \$0          | \$0  | \$91,864,077 |

FUENTE: Adaptación para Colombia de J.M., Grindlay A.L., Serrano F., Rodríguez M.I. y Zamorano M. (2017)

Los ingresos involucrados en cada alternativa están directamente relacionados con los ingresos de los procesos que hacen parte de la alternativa, tal cómo se expresa en la Tabla 6. En las celdas donde se intersectan los procesos con las alternativas y el valor es cero, se puede interpretar como la ausencia de dicho proceso en dicha alternativa.

Como propuesta de valor en esta investigación, las cifras registradas en la Tabla 17 para los ingresos de cada proceso, corresponden al cálculo del valor presente neto, de los ingresos de cada proceso proyectados a 20 años, que, según el artículo referenciado, es la vida útil de las tecnologías desarrolladas. El valor de la TIR usada en los cálculos fue adoptada del estudio hecho por (Funcener, 2018) la cual es de un 14.4% para proyectos de energías renovables. La aplicación del VPN permitirá entonces, considerar no sólo los ingresos bajo condiciones actuales, si no también, tener una aproximación económica que considere los ingresos durante la vida útil de la tecnología.

Bajo las condiciones establecidas para Colombia, considerando toda la información recolectada y presentada a lo largo de las tablas (5) al (17), que establecen los datos de distribución de los RSU, materiales recuperados, inversiones y costos, cantidad de mano de obra, precios de venta de los materiales recuperados y subproductos e ingresos de los procesos y alternativas compuestas por estos, se procede a calcular la utilidad para cada una de las alternativas alternativa, cómo se definió anteriormente, es la diferencia entre el total de ingresos y el total de costos de cada alternativa, este parámetro permitirá evaluar económicamente la implementación de las alternativas propuestas para Colombia en esta investigación, en la Tabla 18 se presentan las utilidades calculadas.

Tabla 18. Utilidad para cada alternativa

| ALTERNATIVA | TOTAL COSTOS | TOTAL INGRESOS | UTILIDAD (PESOS/TON) |
|-------------|--------------|----------------|----------------------|
| 0           | \$601,641    | \$33,871,274   | \$33,269,633         |
| A           | \$473,763    | \$61,159,712   | \$60,685,949         |
| B           | \$572,262    | \$83,980,116   | \$83,407,854         |
| C           | \$506,503    | \$66,258,480   | \$65,751,977         |
| D           | \$730,069    | \$80,233,387   | \$79,503,318         |
| E           | \$875,586    | \$91,864,077   | \$90,988,491         |

FUENTE: Adaptación para Colombia de J.M., Grindlay A.L., Serrano F., Rodríguez M.I. y Zamorano M. (2017)

Con base en los resultados obtenidos, la alternativa que ofrece la utilidad más alta bajo las condiciones del contexto colombiano es la alternativa E, que según la tabla 6, está compuesta por tratamiento mecánico, incineración con recuperación de energía y disposición final en vertedero con recuperación de cenizas.

Si se analizan individualmente los procesos que conforman esta alternativa, se puede observar que para los pretratamientos (Tratamiento Mecánico y Tratamiento Biológico), el Tratamiento Mecánico es el que aporta con mayores ingresos dentro de este grupo. La incineración con recuperación energética es la alternativa de aprovechamiento energético con más altos ingresos, por encima de la digestión anaerobia, la gasificación y los vertederos con gasificación. El vertedero con recuperación de cenizas es el proceso de disposición final que cuenta con el más alto ingreso por tonelada registrado, excluyendo al vertedero con gasificación debido a que este proceso incluye el procesamiento del rechazo del tratamiento biológico lo que provoca ingresos mediante la producción de electricidad para este proceso.

La segunda alternativa con la utilidad más alta es la alternativa B, que está compuesta por tratamiento mecánico, tratamiento biológico, digestión anaerobia y vertedero con gasificación, este hallazgo respalda el planteamiento hecho de que la adición de rechazos de los tratamientos biológicos y mecánicos, valoriza económicamente a los procesos que los reciben, en este caso la digestión anaerobia para el rechazo del tratamiento biológico y el vertedero con gasificación para el rechazo del tratamiento mecánico.

En contraste, la alternativa con menor utilidad es la alternativa 0 que representa la situación actual del aprovechamiento energético en Colombia, esta alternativa está compuesta por tratamiento mecánico, tratamiento biológico y vertedero. La conclusión a la cual se puede llegar por medio de la utilidad de esta alternativa es que carece de un proceso de valorización económica para los RSU, ya sea con producción de electricidad o producción de subproductos.

En otras palabras, Colombia en este momento de acuerdo con la evaluación económica propuesta, bajo las condiciones actuales, está llamada a implementar un sistema integrado de procesos que permitan valorar las toneladas de RSU que a diario se producen en el país y que actualmente más que ser una oportunidad de desarrollo económico y competitivo para Colombia mediante su aprovechamiento, son una pérdida de recursos y uno de los pilares para el problema planteado inicialmente en este proyecto.

Por otra parte, es posible establecer escenarios con los cuales se pueda medir la sensibilidad en la utilidad de las alternativas propuestas en este estudio, en respuesta a cambios de las condiciones actuales. Con este propósito, se plantearon dos escenarios donde varían los valores para la distribución de los RSU en Colombia (Tabla 10).

El primer escenario supone un cambio en el hábito de producción de desechos en Colombia, afectando directamente los valores para la materia orgánica y el plástico. El cambio estaría representado por una disminución del 75% del porcentaje de materia orgánica presente actualmente en los RSU en Colombia y en contraste un aumento del 75% del plástico presente en los RSU. El porcentaje tanto de disminución como incremento fue escogido arbitrariamente, el objetivo es simplemente observar la respuesta en la utilidad de las alternativas ante variaciones en las condiciones iniciales.

A continuación, en la Tabla 19 se presenta el nuevo calculo de la utilidad, teniendo en cuenta las variaciones propuestas por el escenario 1.

Tabla 19. Utilidad para cada alternativa con variaciones en la distribución de los RSU

| ALTERNATIVA | TOTAL COSTOS | TOTAL INGRESOS | UTILIDAD<br>(PESOS/TON) |
|-------------|--------------|----------------|-------------------------|
| 0           | \$601,641    | \$33,750,944   | \$33,149,303            |
| A           | \$473,763    | \$60,979,216   | \$60,505,453            |
| B           | \$572,262    | \$67,340,812   | \$66,768,550            |
| C           | \$506,503    | \$66,017,819   | \$65,511,316            |
| D           | \$730,069    | \$80,113,056   | \$79,382,988            |
| E           | \$875,586    | \$91,743,747   | \$90,868,160            |

FUENTE: Adaptación para Colombia de J.M., Grindlay A.L., Serrano F., Rodríguez M.I. y Zamorano M. (2017)

La respuesta de la utilidad ante las variaciones hechas en la distribución de los RSU está principalmente determinada por la variación en la utilidad de la alternativa B, la cual como se mencionó anteriormente, valoriza efectivamente la materia orgánica presente en los RSU. La alternativa que toma el segundo lugar según su utilidad es la alternativa D, compuesta por tratamiento mecánico, gasificación y disposición final en vertedero con recuperación de cenizas. Este resultado, es consecuente con el primer resultado obtenido bajo las condiciones reales y actuales, debido a que, según la evaluación hecha, la gasificación es el segundo proceso que mejor valoriza el rechazo proveniente del tratamiento mecánico, por lo que es de esperarse que ante una disminución del 75% de la materia orgánica, la gasificación se consolide como una mejor alternativa de valorización de los RSU con la distribución supuesta.

El segundo escenario supone una reducción del 50% en la tasa de transformación a energía eléctrica de la gasificación  $\eta_g$  y la incineración  $\eta_i$ , en la Tabla 20 se presenta el nuevo calculo de la utilidad, teniendo en cuenta las variaciones propuestas por el escenario 2.

Tabla 20. Utilidad para cada alternativa con variaciones las tasas de transformación

| ALTERNATIVA | TOTAL     | TOTAL        | UTILIDAD (PESOS/TON) |
|-------------|-----------|--------------|----------------------|
| 0           | \$601,641 | \$33,871,274 | \$33,269,633         |
| A           | \$473,763 | \$61,159,712 | \$60,685,949         |
| B           | \$572,262 | \$83,980,116 | \$83,407,854         |
| C           | \$506,503 | \$66,258,480 | \$65,751,977         |
| D           | \$730,069 | \$56,352,737 | \$55,622,669         |
| E           | \$875,586 | \$62,168,121 | \$61,292,535         |

FUENTE: Adaptación para Colombia de J.M., Grindlay A.L., Serrano F., Rodríguez M.I. y Zamorano M. (2017)

Es evidente que el hecho de afectar la tasa con la cual los procesos de gasificación e incineración transforman las RSU en electricidad, cambia por completo la utilidad de estas alternativas, en este escenario la mejor utilidad la tiene la alternativa B que no está conformada por gasificación ni incineración.

Este escenario le abre la puerta para que la alternativa que involucra la producción de CSR tome protagonismo en el análisis económico, ya que este alternativa al no depender de la gasificación ni la incineración, tampoco de la materia orgánica, se pueda mantener estable a las variaciones.

## 7. CONCLUSIONES

- Colombia está siendo rezagada en competitividad tecnológica por los países europeos, muestra de esto es el índice de innovación que para Colombia en el año 2017 fue de 34.78, valor muy por debajo del promedio europeo que se ubicó en 48.03 para el mismo año.
- Colombia es un país que depende aún en gran manera de los combustibles fósiles para la producción de electricidad, siendo el carbón la principal fuente de producción eléctrica con un 44% de participación en la PEP nacional, seguido por el petróleo crudo con un 42% de participación. Europa por su parte, apuesta en mayor medida a la energía nuclear, esta representa el 28.6% de la PEP y el 26.7% fue para las energías renovables.
- Los rellenos sanitarios son la alternativa principal de disposición final de RSU en Colombia, aproximadamente 83% de los residuos generados van a parar a estos sitios y tan sólo el 17% es reciclado. En contraste, Europa en el año 2017 envió tan solo 10.2% de sus residuos a rellenos sanitarios, apuestan principalmente a la valorización de los RSU, en el año 2017 enviaron el 36.2% de sus residuos a diferentes métodos de valorización.
- En Colombia, de las 97.000 toneladas de RSU que aproximadamente son tratadas, se recupera en mayor proporción papel y cartón, estos representan el 53% del material recuperado en Colombia.
- En términos de la distribución de los RSU, Colombia presenta una proporción elevada de materia orgánica en sus residuos, más de la mitad (61.53%) de sus residuos son este tipo de desecho, el plástico ocupa el segundo lugar con aproximadamente 14% de la distribución total.
- El proceso que mejor desempeño tiene en la producción de energía eléctrica con base en los RSU colombianos es la incineración con recuperación energética con una producción estimada de 28.425.612 de kWh/año, no obstante el alto porcentaje de materia orgánica presente en los RSU consolida a la digestión anaerobia como un método para ser tenido en cuenta para la valorización energética de los RSU, con un aporte anual de 20.929.515 kWh.
- El aprovechamiento actual de RSU en Colombia, conlleva a una pérdida aproximada de 61% sobre la rentabilidad más alta, alcanzable en el país al cambiar el modelo de aprovechamiento.
- Según el modelo propuesto, la separación mecánica de los RSU en la fuente o el reciclaje, junto con la incineración con recuperación energética y una disposición final en vertederos con recuperación de cenizas, es el modelo ideal de aprovechamiento de residuos para Colombia, representando una utilidad aproximada de \$91.000.000 de pesos anuales. Esto debido al aporte crucial que hace el rechazo proveniente del tratamiento mecánico, para el aumento de producción de energía eléctrica por medio de la incineración y finalmente los bajos costos de disponer en vertedero el porcentaje que no fue aprovechado.
- La evaluación arrojó que bajo las condiciones actuales de los RSU en Colombia, la digestión anaerobia, junto con el tratamiento biológico y el vertedero con recuperación de cenizas es la segunda mejor alternativa para la valorización de residuos, aportando una utilidad anual de \$83,407,854 pesos.

- Ante un eventual cambio en la composición de los RSU, la gasificación es la segunda mejor opción para valorizar los RSU en Colombia, debido a su alta eficiencia para la transformación de residuos en energía y adicionalmente a la incorporación del rechazo del tratamiento mecánico con esta, este último marca una diferencia significativa en la producción de electricidad cuando se combina con alternativas como la gasificación o la incineración.

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- <http://www.un.org/es/sections/issues-depth/population/index.html>
- <http://www.lavanguardia.com/vida/20160201/301816846969/mapa-crecimiento-poblacion-mundial.html>
- <http://worldpopulationhistory.org/map/2017/mercator/1/0/25/>
- Naciones Unidas. *World Population Prospects*. (2015)
- <http://www.atlas.d-waste.com>
- Consejo Nacional de Política Económica y Social CONPES, Versión 3874 (2015)
- Jhuma Sadhukhan, Elias Martinez-Hernandez. *Material flow and sustainability analyses of biorefining of municipal solid waste*. (2017)
- Banco Interamericano de Desarrollo. *Situación de la gestión de residuos sólidos en América Latina y el Caribe*. (2015)
- Banco Interamericano de Desarrollo. *Dossier Energético: Colombia*. (2017)
- <https://www.elespectador.com/noticias/nacional/derrame-de-petroleo-tumaco-el-peor-desastre-ambiental-1-articulo-568408>
- <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-13366835>
- <https://www.cepal.org/es/noticias/la-poblacion-america-latina-alcanzara-625-millones-personas-2016-segun-estimaciones-la>
- Revista Dinero. *Qué significa que Colombia alcance 50 millones de habitantes*. (2017)  
<http://www.dinero.com/edicion-impresa/pais/articulo/implicaciones-del-crecimiento-poblacional-de-colombia-en-los-ultimos-anos/250398>
- Alcaldía de Santiago de Cali. *Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos – PGIRS 2015 – 2027*. (2015)
- Avendaño Acosta, Edwin Fabián. *Panorama actual de la situación mundial, nacional y distrital de los residuos sólidos. análisis del caso Bogotá D: C. Programa basura cero*. (2015)
- Revisto Eroski Consumer. *Diez ciudades con una gestión de residuos ejemplar*. (2016)  
[http://www.consumer.es/web/es/medio\\_ambiente/urbano/2016/01/13/223208.php](http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/urbano/2016/01/13/223208.php)
- Agencia de Noticias Universidad Nacional. *Explotación de petróleo afecta suelos y fuentes hídricas del Meta*. (2017)
- J. Malinauskaite, H. Jouhara, D. Czajczynska, P. Stanchev, E. Katsou, P. Rostkowski, R.J. Thorne, J. Colon, S. Ponsa, F. Al-Mansour, L. Anguilano, R. Krzyzyska, I.C. López, A. Vlasopoulos, N. Spencer. (2017) Municipal solid waste management and waste-to-energy in the context of a circular economy and energy recycling in Europe. *Energy* 141 (1) 2013-2044
- Sistema Nacional de Competitividad, Ciencia, Tecnología e Investigación SNCCTI (2017) Índice Global de Innovación.  
<http://www.colombiacompetitiva.gov.co/sneci/Paginas/indicadores-internacionales-igi.aspx>

- Oficina de estadística europea (Eurostat). (2017) *Producción e importaciones de energía*.
- Serrano Moya, Edgar David (2014). Desarrollo tecnológico y Brecha tecnológica entre países de América Latina. *Ánfora*, 21(36), 41-65. Universidad Autónoma de Manizales. ISSN 0121-6538.
- Departamento Nacional de Planeación DNP (2016). Rellenos sanitarios de 321 municipios colapsarán en cinco años, advierte el DNP.  
<https://www.dnp.gov.co/Paginas/-Rellenos-sanitarios-de-321-municipios-colapsar%C3%A1n-en-cinco-a%C3%B1os,-advier-te-el-DNP-.aspx>
- Oficina de estadística europea (Eurostat). (2017) Electricity production, consumption and market overview.
- Superintendencia de servicios públicos domiciliarios Superservicios. (2017) Informe Nacional de aprovechamiento.
- Concilio Mundial de Energía (2016) *World Energy Resources – Waste to Energy*.
- CODENSA (2017) Nuevos valores del Kilovatio en Colombia.  
<https://www.codensa.com.co/hogar/valor-del-kilovatio-en-colombia-disminuye>
- Compromiso Empresarial para el Reciclaje CEMPRE (2017) *Guía para el cálculo de la tarifa de aprovechamiento y tips de comercialización de materiales*.
- Red Enlace Profesional (2017) Escala salarial 2017 según nivel de formación y perfil de los graduados.
- Funcener (2018) *¿La Energía Solar en Colombia es Rentable?*  
<http://funcener.org/la-energia-solar-en-colombia-es-rentable/>

## 9. ANEXOS

Anexo 1. Índice de aprovechamiento

| Municipio            | Toneladas Aprovechadas | Toneladas Generadas | Índice de Aprovechamiento |
|----------------------|------------------------|---------------------|---------------------------|
| BARRANCABERMEJA      | 827                    | 49,219              | 1.7                       |
| BARRANQUILLA         | 1,168                  | 514,781             | 0.2                       |
| BOGOTA               | 78,616                 | 2,253,819           | 3.5                       |
| BUCARAMANGA          | 2,495                  | 293,187             | 0.9                       |
| CARMEN DE CARUPA     | 200                    | 525                 | 38.1                      |
| CARTAGENA            | 166                    | 419,438             | 0.04                      |
| CARTAGO              | 181                    | 25,381              | 0.7                       |
| DUITAMA              | 259                    | 25,537              | 1.0                       |
| EL CARMEN DE VIBORAL | 743                    | 8,623               | 8.6                       |
| EL SANTUARIO         | 419                    | 4,782               | 8.8                       |
| ENVIGADO             | 624                    | 76,524              | 0.8                       |
| FLORIDABLANCA        | 51                     | 81,009              | 0.1                       |
| GIRON                | 42                     | 39,306              | 0.1                       |
| ITAGUI               | 246                    | 38,366              | 0.6                       |
| LA CEJA              | 476                    | 8,380               | 5.7                       |
| MARINILLA            | 976                    | 12,523              | 7.8                       |
| MEDELLIN             | 5,309                  | 630,566             | 0.8                       |
| MONTERIA             | 1,521                  | 113,112             | 1.3                       |
| PEREIRA              | 90                     | 144,090             | 0.1                       |
| PIEDRECUESTA         | 54                     | 22,893              | 0.2                       |
| POPAYAN              | 680                    | 78,731              | 0.9                       |
| RIOHACHA             | 257                    | 45,162              | 0.6                       |
| RIONEGRO             | 1,824                  | 35,100              | 5.2                       |
| SANTA MARTA          | 498                    | 180,580             | 0.3                       |
| SOACHA               | 63                     | 131,429             | 0.05                      |
| VALLEDUPAR           | 75                     | 138,279             | 0.1                       |
| ZIPAQUIRA            | 46                     | 25,850              | 0.2                       |
| TOTAL                | 97,905                 | 5,397,191           | 1.8                       |

FUENTE: Sistema Único de Información

Anexo 2. Aprovechamiento de los RSU en Europa en 2014

|                    | Total<br>(Millones<br>de<br>Tonelada<br>s) | Vertedero<br>s (%) | Incineració<br>n (%) | Recuperació<br>n de Energía<br>(%) | Rellen<br>o (%) | Reciclaj<br>e (%) |
|--------------------|--------------------------------------------|--------------------|----------------------|------------------------------------|-----------------|-------------------|
| UE - 28            | 2319.5                                     | 47.4               | 1.5                  | 4.7                                | 10.2            | 36.2              |
| Bélgica            | 42.8                                       | 8.2                | 4.3                  | 13.6                               | 0.0             | 73.9              |
| Bulgaria           | 175.7                                      | 97.9               | 0.0                  | 0.1                                | 0.0             | 2.0               |
| República<br>Checa | 19.9                                       | 17.3               | 0.4                  | 5.1                                | 29.1            | 48.1              |
| Dinamarca          | 17.7                                       | 21.7               | 0.0                  | 20.7                               | 0.0             | 57.6              |
| Alemania           | 370.7                                      | 19.2               | 2.3                  | 10.5                               | 25.3            | 42.7              |
| Estonia            | 20.7                                       | 65.6               | 0.0                  | 2.5                                | 11.9            | 20.0              |
| Irlanda            | 10.0                                       | 42.6               | 0.1                  | 7.2                                | 37.4            | 12.7              |
| Grecia             | 67.1                                       | 88.4               | 0.0                  | 0.2                                | 8.1             | 3.2               |
| España             | 103.4                                      | 47.9               | 0.0                  | 3.4                                | 12.6            | 36.1              |
| Francia            | 299.7                                      | 29.3               | 2.0                  | 4.5                                | 10.7            | 53.6              |
| Croacia            | 3.5                                        | 51.1               | 0.0                  | 1.4                                | 2.0             | 45.5              |
| Italia             | 129.2                                      | 16.0               | 5.2                  | 1.6                                | 0.2             | 76.9              |
| Chipre             | 1.8                                        | 58.9               | 0.0                  | 1.7                                | 25.9            | 13.5              |
| Letonia            | 1.9                                        | 34.8               | 0.0                  | 8.7                                | 0.9             | 55.5              |
| Lituania           | 4.5                                        | 67.6               | 0.1                  | 4.1                                | 2.5             | 25.8              |
| Luxemburgo         | 8.5                                        | 38.3               | 0.0                  | 2.5                                | 16.0            | 43.3              |
| Hungría            | 13.7                                       | 39.4               | 0.7                  | 8.9                                | 3.7             | 47.3              |
| Holanda            | 130.6                                      | 45.4               | 1.0                  | 7.9                                | 0.0             | 45.7              |
| Austria            | 53.9                                       | 38.6               | 0.2                  | 6.5                                | 20.1            | 34.7              |
| Polonia            | 182.4                                      | 24.9               | 0.4                  | 2.7                                | 21.5            | 50.5              |
| Portugal           | 9.9                                        | 31.8               | 10.0                 | 3.1                                | 0.0             | 55.0              |
| Romania            | 172.2                                      | 94.4               | 0.0                  | 1.3                                | 0.6             | 3.7               |
| Eslovenia          | 5.4                                        | 9.2                | 0.6                  | 4.9                                | 33.5            | 51.8              |
| Eslovaquia         | 7.1                                        | 53.8               | 0.8                  | 4.4                                | 0.0             | 40.9              |
| Finlandia          | 93.3                                       | 80.9               | 0.5                  | 4.8                                | 0.0             | 13.8              |
| Suecia             | 163.3                                      | 84.4               | 0.1                  | 4.7                                | 1.6             | 9.3               |
| Reino Unido        | 209.0                                      | 41.5               | 3.6                  | 0.9                                | 10.4            | 43.6              |
| Noruega            | 11.7                                       | 17.9               | 0.5                  | 35.8                               | 5.3             | 40.5              |
| Albania            | 1.2                                        | 74.8               | 3.1                  | 0.5                                | 0.0             | 21.6              |
| Serbia             | 49.4                                       | 97.3               | 0.0                  | 0.1                                | 0.0             | 2.6               |
| Turquía            | 79.3                                       | 70.2               | 0.0                  | 0.7                                | 0.0             | 29.0              |

FUENTE: Eurostat, 2017

**Anexo 3. Costos por categorías de empleado en Colombia**

| <b>Categoría</b>                                                                                                   | <b>SALARIO MAS AUX. TRANSP. AÑO 2.018</b><br>Art.147 C.S.T. | <b>VACACIONES AÑO 2.018</b><br>Art.186 C.S.T. | <b>PRIMA DE SERVICIOS AÑO 2.018</b><br>Art.306 C.S.T. | <b>CESANTÍAS MAS INTERÉS CESANTÍAS</b> Art.249 C.S.T. | <b>APORTE PARA PENSION</b><br>12% | <b>APORTE PARA SALUD</b><br>8.5% | <b>PAGO RIESGOS LABORALES</b><br>100% | <b>APORTES PARAFISCALES</b><br>(CAJAS, ICBF, SENA) | <b>DOTACIONES Y ELEMENTOS PROTECCIÓN</b> | <b>TOTAL SALARIOS, PRESTACIONES SOCIALES Y APORTES DE LEY</b> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| <b>CATEGORÍA A 1</b><br>NIVEL PROFESIONAL<br>L Título pregrado con experiencia en área de formación de 1 a 3 años. | 28.560.000                                                  | 1.190.000                                     | 2.380.000                                             | 2.665.600                                             | 3.427.200                         | 2.427.600                        | 1.987.776                             | 2.570.400                                          | -                                        | <b>45.208.576</b>                                             |
| <b>CATEGORÍA A 2</b><br>NIVEL TECNÓLOGO<br>Título Tecnólogo con experiencia en área de formación de 1 a 3 años.    | 18.960.000                                                  | 790.000                                       | 1.580.000                                             | 1.769.600                                             | 2.275.200                         | 1.611.600                        | 1.319.616                             | 1.706.400                                          | -                                        | <b>30.012.416</b>                                             |
| <b>CATEGORÍA A 3</b><br>NIVEL TÉCNICO<br>Con experiencia en área de formación de 1 a 2 años.                       | 10.433.436                                                  | 390.621                                       | 869.453                                               | 973.787                                               | 1.124.988                         | 796.867                          | 652.493                               | 843.741                                            | 656.243                                  | <b>16.741.631</b>                                             |

FUENTE: Elaboración propia – Basado en el Código Sustantivo del Trabajo Colombiano.