

**Análisis de la gestión de residuos peligrosos en el área metropolitana de  
Bucaramanga en el marco de la Economía Circular**

**Judith Carolina Jaimes Velandia**

**Trabajo de grado para optar el título de Magíster en Ciencias y Tecnologías  
Ambientales**

**Directora**

**Alba Josefa. Vargas Buitrago**

**Ingeniera Química M. Sc.**

**Co directora**

**Martha Cervantes Díaz**

**Química M. Sc.**

**Universidad Santo Tomás, Bucaramanga**

**División de Ingenierías y Arquitectura,**

**Maestría en Ciencias y Tecnologías Ambientales**

**2023**

**Dedicatoria**

A Dios por permitirme culminar esta nueva etapa académica de mi vida

A mi familia por su amor y apoyo incondicional

### **Agradecimientos**

A Dios por concederme la fuerza para culminar cada etapa de los proyectos propuestos.

A mis padres, Carlos y Luz Marina, por su apoyo incondicional en cada una de las etapas de mi vida.

A mi directora, Profesora Alba Vargas, por su orientación y su tiempo.

A mi co-directora, Profesora Martha Cervantes, por su constante apoyo, orientación y paciencia.

## Contenido

|  |    |
|--|----|
| Introducción .....   | 15 |
| 1. Análisis de la gestión de residuos peligrosos en el área metropolitana de Bucaramanga en el marco de la Economía Circular.....                      | 17 |
| 1.1 Planteamiento del problema.....  | 17 |
| 1.2 Justificación.....   | 19 |
| 1.3 Objetivos .....  | 20 |
| 2. Marco referencial.....  | 20 |
| 2.1 Economía circular .....  | 20 |
| 2.1.1 Residuo o Desecho.....   | 24 |
| 2.1.1 Residuo Peligroso (RESPEL).....  | 25 |
| 3. Método.....   | 34 |
| 3.1 Caracterización de los principales residuos peligrosos en los municipios que conforman el área metropolitana de Bucaramanga .....                  | 35 |
| 3.2 Identificación del potencial de aprovechamiento de los residuos peligrosos generados en el área metropolitana de Bucaramanga .....                 | 36 |
| 3.3 Identificación de los procesos de aprovechamiento de los principales residuos peligrosos identificados empleando herramientas bibliométricas. .... | 36 |
| 4. Resultados.....   | 39 |
| 4.1 Caracterización de los principales residuos peligrosos en los municipios que conforman el área metropolitana de Bucaramanga .....                  | 39 |
| 4.1.1 Información oficial recopilada.....  | 40 |
| 4.1.2 Generación de residuos o desechos peligrosos.....  | 40 |

|  |    |
|--|----|
| 4.2 Identificación del potencial de aprovechamiento de los residuos peligrosos generados en el área metropolitana de Bucaramanga. Minería de texto.....                                | 45 |
| 4.2.1 Áreas de conocimiento .....  | 46 |
| 4.2.2 Dinámica científica.....   | 47 |
| 4.2.3. Revistas científicas .....  | 48 |
| 4.2.4 Países .....   | 49 |
| 4.2.5 Nube de palabras clave .....   | 50 |
| 4.2.6 Análisis de co-ocurrencia .....  | 52 |
| 4.3 Propuesta de implementación de un modelo metodológico para la aplicación de procesos de Economía Circular en la gestión de los principales residuos peligrosos identificados. .... | 54 |
| 4.3.1 Residuos hospitalarios .....   | 54 |
| 4.3.2 Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos.....  | 56 |
| 4.3.3 Tecnologías de tratamiento para la recuperación de metales a partir de residuos electrónicos.....  | 57 |
| 4.3.4 Minería Urbana y sus tendencias en el mercado .....  | 65 |
| 5. Conclusiones .....  | 66 |
| Referencias.....   | 68 |
| Apéndices.....   | 76 |

**Lista de tablas**

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabla 1.</b> <i>Principios de la Economía Circular</i> .....  | 23 |
| <b>Tabla 2.</b> <i>Clasificación de los residuos sólidos de acuerdo con su peligrosidad</i> .....  | 24 |
| <b>Tabla 3.</b> <i>Indicadores cuantitativos para artículos científicos</i> .....  | 38 |
| <b>Tabla 4.</b> <i>Cantidad de residuos peligrosos generados en el área metropolitana de Bucaramanga durante el periodo comprendido entre 2016-2021.</i> ..... | 41 |
| <b>Tabla 5.</b> <i>Cantidad de residuos peligrosos generados en el área metropolitana de Bucaramanga durante el periodo comprendido entre 2016-2021.</i> ..... | 43 |
| <b>Tabla 6.</b> <i>Tipos de metales recuperables en procesos de minería urbana.</i> .....  | 56 |
| <b>Tabla 7.</b> <i>Identificación de procesos de recuperación y/o valorización de residuos o desechos peligrosos -Revisión Bibliográfica.</i> .....            | 64 |

**Lista de figuras**

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1.</b> <i>Modelo de economía lineal</i> .....  | 21 |
| <b>Figura 2.</b> <i>Modelo de economía circular</i> .....  | 21 |
| <b>Figura 3.</b> <i>PIB de Santander por actividad económica</i> .....   | 28 |
| <b>Figura 4.</b> <i>Descomposición del sector industria en Santander, año 2021</i> .....   | 29 |
| <b>Figura 5.</b> <i>Inventario de empresas activas en Santander</i> .....  | 30 |
| <b>Figura 6.</b> <i>Jerarquización del modelo de gestión de residuos peligrosos</i> .....  | 31 |
| <b>Figura 7.</b> <i>Esquema metodológico para el desarrollo del proyecto: Análisis de la gestión de residuos peligrosos en el Área Metropolitana de Bucaramanga en el marco de la economía circular</i> .....            | 35 |
| <b>Figura 8.</b> <i>Proceso metodológico de la vigilancia tecnológica</i> .....  | 37 |
| <b>Figura 9.</b> <i>Cantidad de residuos o desechos generados en el periodo comprendido entre 2016 y 2021</i> .....  | 41 |
| <b>Figura 10.</b> <i>Composición de las principales actividades generadoras de residuos o desechos peligrosos</i> .....  | 43 |
| <b>Figura 11.</b> <i>Porcentaje de residuos peligrosos generados en el área metropolitana de Bucaramanga durante el periodo comprendido entre 2016-2021</i> .....  | 44 |
| <b>Figura 12.</b> <i>Áreas de conocimiento en las cuales se orienta la investigación relacionada del potencial de aprovechamiento de los residuos peligrosos generados en el área metropolitana de Bucaramanga</i> ..... | 46 |
| <b>Figura 13.</b> <i>Distribución de artículos por año relacionados con el potencial de aprovechamiento de los residuos peligrosos generados en el área metropolitana de Bucaramanga</i> .....                           | 48 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 14.</b> <i>Nube de palabras asociadas con el potencial de aprovechamiento de los residuos peligrosos generados en el área metropolitana de Bucaramanga. ....</i>                      | 52 |
| <b>Figura 15.</b> <i>Análisis de co-ocurrencia de palabras asociadas con el potencial de aprovechamiento de los residuos peligrosos generados en el área metropolitana de Bucaramanga. ....</i> | 53 |
| <b>Figura 16.</b> <i>Ciclo secuencial para el manejo y la gestión adecuados de los desechos electrónicos<br/>.....</i>  | 62 |

**Lista de apéndices**

|   |    |
|---|----|
| <b>Apéndice A.</b> <i>Características y propiedades que le confieren peligrosidad a un residuo o desecho</i><br>.....       | 76 |
| <b>Apéndice B.</b> <i>Clasificación del residuos o desechos peligrosos de acuerdo con la actividad que lo genera.</i> ..... | 79 |
| <b>Apéndice C.</b> Rangos de CIU y sectores económicos generadores de residuos o desechos peligrosos .....                  | 87 |
| <b>Apéndice D.</b> <i>Procesos de aprovechamiento, valorización y tratamiento de residuos o desechos peligrosos</i> .....   | 89 |

### Resumen

El avance en el manejo de los residuos o desechos peligrosos - RESPEL desde la implementación de la Política Nacional en el año 2005 ha permitido mejorar los procesos de gestión en diferentes ámbitos. No obstante, la gestión de residuos peligrosos en Colombia aún presenta grandes retos entre los cuales se encuentra la búsqueda de alternativas que minimicen la disposición final de estos e incentiven el aprovechamiento y/o la valorización.

En este estudio se evaluó la gestión de residuos peligrosos en el área metropolitana de Bucaramanga y su aplicación en procesos de Economía Circular; lo anterior, a partir de la cuantificación de los residuos generados y el análisis de alternativas ambientalmente sostenibles que permitan potenciar su reincorporación a la industria; dichas alternativas de aprovechamiento, tratamiento y/o valorizaciones identificadas mediante el proceso de minería de texto. Dentro de estas alternativas se identificaron procesos de valorización energética, así como recuperación de metales preciosos y no preciosos a través de procesos como pirometalurgia, hidrometalurgia, biolixiviación y biosorción

Finalmente, el documento plantea un modelo para la recuperación y reincorporación de materias primas extraídas de residuos que de acuerdo con lo establecido en el Decreto 1076 de 2015 y la Política Nacional de Residuos Peligrosos, formulada en el año 2005 y actualizada en el año 2022, son considerados peligrosos.

*Palabras clave:* aprovechamiento, economía circular, gestión, residuos peligrosos, valorización

### **Abstract**

The progress in the management of waste or hazardous waste - RESPEL since the implementation of the National Policy in 2005 has made it possible to improve management processes in different areas. However, the management of hazardous waste in Colombia still presents great challenges, among which is the search for alternatives that minimize the final disposal of these and encourage their use and/or recovery.

This study evaluated the management of hazardous waste in the Bucaramanga metropolitan area and its application in Circular Economy processes; the foregoing, based on the quantification of the waste generated and the analysis of environmentally sustainable alternatives that allow promoting its reincorporation into the industry; alternatives for use, treatment and/or recovery identified through the text mining process. Within these alternatives, energy recovery processes were identified, as well as the recovery of precious and non-precious metals through processes such as pyrometallurgy, hydrometallurgy, bioleaching and biosorption.

Finally, the document proposes a model for the recovery and reincorporation of raw materials extracted from waste that, in accordance with the provisions of Decree 1076 of 2015 and the National Hazardous Waste Policy, formulated in 2005 and updated in 2022, They are considered dangerous.

*Keywords:* circular economy, management, hazardous waste, recovery, us

### Glosario

*Aprovechamiento y/o valorización:* es el proceso de recuperar el valor remanente o el poder calorífico de los materiales que componen los residuos o desechos peligrosos, por medio de la recuperación, el reciclado o la regeneración.(Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015, p.292)

*Ciclo de vida de un producto:* todas las etapas del desarrollo de un producto, incluidos su diseño, la extracción o adquisición de materia prima, producción, comercialización, uso, reutilización, reciclaje, y reincorporación al ciclo productivo o hasta su disposición final.(CONPES, 2018)

*Disposición final.* Es el proceso de aislar y confinar los residuos o desechos peligrosos, en especial los no aprovechables, en lugares especialmente seleccionados, diseñados y debidamente autorizados, para evitar la contaminación y los daños o riesgos a la salud humana y al ambiente.(Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015, p.292)

*Economía circular:* modelo que busca que el valor de los productos, los materiales y los recursos se mantenga en la economía durante el mayor tiempo posible, y que se reduzca al mínimo la generación de residuos.(CONPES, 2018, p.62)

*Generador:* cualquier persona natural o jurídica cuya actividad produzca residuos o desechos peligrosos. Si la persona es desconocida será la persona que está en posesión de estos residuos. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015, p. 292)

*Gestión integral:* conjunto coordinado de acciones de política, normativas, operativas, financieras, de planeación, administrativas, sociales, educativas, de evaluación, seguimiento y monitoreo desde la prevención de la generación hasta la disposición final de los residuos o desechos peligrosos. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015, p.292 )

*Gestión diferencial:* los residuos se manejarán y gestionarán de forma independiente por corrientes o flujos de residuos, desde la cuna hasta la cuna, con el fin de viabilizar su aprovechamiento y valorización. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015; p.292)

*Manejo integral:* es la adopción de todas las medidas necesarias en las actividades de prevención, reducción y separación en la **fuentes**, acopio, almacenamiento, transporte, aprovechamiento y/o valorización, tratamiento y/o disposición final, importación y exportación de residuos o desechos peligrosos que puede ser realizada por el generador o por un tercero garantizando la no afectación a la salud y al ambiente. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015)

*Minería Urbana:* son las técnicas alternativas para obtener recursos y reducir los impactos generados de la extracción minerales vírgenes en la cadena productiva, e incluye la recuperación sistemática de materiales de los acervos urbanos (Krook, et al., 2015). La minería urbana significa la recuperación de valor, la coordinación de materiales, información y servicios permite la recuperación de valor de diversas fuentes antropogénicas.(Xavier, et al., 2023)

*Receptor:* es el tercero autorizado para realizar las actividades de almacenamiento, aprovechamiento y/o valorización (incluida la recuperación, el reciclado o la regeneración), el tratamiento y/o la disposición final de residuos o desechos peligrosos. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015, p.292)

*Residuo:* es cualquier objeto, material, sustancia, elemento o producto que se encuentra en estado sólido o semisólido, o es un líquido o gas contenido en recipientes o de pósitos, cuyo productor descarta, rechaza o entrega porque sus propiedades no permiten usarlo nuevamente en la actividad que lo generó o porque la legislación o la normatividad vigente así lo estipula. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015, p.292)

*Residuos posconsumo:* aquel producto que, al concluir su vida útil, por sus características físicas o químicas o por su consumo masivo, requiere de manejo y tratamiento especial y diferencial, para prevenir la afectación del ambiente y la salud humana.(CONPES, 2018, p.63)

*Residuo o desecho peligroso:* es aquel residuo o desecho que por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables, infecciosas o radiactivas puede causar riesgo o daño para la salud humana y el ambiente. Así como los envases, empaques y embalajes que hayan estado en contacto con ellos. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015, p.292)

*Tratamiento:* es el conjunto de operaciones, procesos o técnicas mediante los cuales se modifican las características de los residuos o desechos peligrosos, teniendo en cuenta el riesgo y grado de peligrosidad de estos, para incrementar sus posibilidades de aprovechamiento y/o valorización o para minimizar los riesgos para la salud humana y el ambiente.(Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015, p.292)

*Valorización:* cualquier operación cuyo resultado principal sea que el residuo sirva a una finalidad útil al sustituir a otros materiales, que de otro modo se habrían utilizado para cumplir una función particular, o que el residuo sea preparado para cumplir esa función en la instalación o en la economía en general.(Tecnalia - Departamento Nacional de Planeación, 2018)

## Introducción

El área metropolitana de Bucaramanga conformada por los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta se encuentra ubicada en el nororiente del actual departamento de Santander (Enrique y Navas, 2005) y de acuerdo con el último censo del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) cuenta con una población de 1'284.495 habitantes que corresponde al 55,7% de la población del departamento. En cuanto actividad comercial e industrial según el informe de la Cámara de Comercio de Bucaramanga, Conocer para Transformar, la industria manufacturera es el segundo sector económico más importante del departamento, concentra el 9,2% de la industria del país y ocupa el quinto lugar a nivel nacional (Cámara de Comercio de Bucaramanga, 2022).

Las principales actividades económicas, que corresponden a además de generar residuos no peligrosos, que son aprovechados y/o dispuestos de acuerdo con lo establecido por las autoridades municipales, generan residuos peligrosos que deben gestionarse conforme a lo que establece la política nacional de residuos peligrosos.

En cuanto a la generación de residuos peligrosos, es decir a aquellos residuos que por características físicas, químicas o biológicas pueden generar un riesgo a la salud o al ambiente (MINISTERIO DE AMBIENTE, 2005), en el área metropolitana de Bucaramanga se realiza una gestión que incluye la recolección, transporte y disposición final de los mismos usando tratamientos fisicoquímicos para evitar las posibles afectaciones a la salud y el ambiente. No obstante, no se ha iniciado la concepción de enfocar la gestión de residuos peligrosos en procesos de tratamiento y/o valorización en el marco de la Economía Circular.

En el mundo, la gestión de residuos peligrosos se encuentra en el proceso de transición de un modelo de lineal, que tiene como fin último la disposición final de este tipo de residuos, a un

modelo circular que permita la reincorporación de residuos, convertidos en materias primas, en diferentes procesos productivos y así disminuir los impactos ambientales generados por la extracción de materias primas vírgenes.

El fin de esta investigación se basó en la determinación de la viabilidad de aprovechamiento, tratamiento y/o valorización de residuos peligrosos generados en el área metropolitana de Bucaramanga con el fin que estos se conviertan en materias primas que puedan ser reincorporadas en procesos productivos locales y/o regionales.

Por lo anterior, se hizo necesaria la identificación de los tipos de residuos peligrosos que se generan en el área metropolitana de Bucaramanga y su clasificación de acuerdo con lo establecido en la normativa nacional e internacional. A través de minería de texto identificar procesos de aprovechamiento, tratamiento y/o valorización conforme a las características de peligrosos de cada uno de los residuos y tendientes a la recuperación como materia prima para la reincorporación en otros procesos productivos.

La finalidad del estudio es mostrar un modelo de gestión sostenible, conforme a la normativa vigente, para el manejo de los residuos peligrosos de tal manera que se alcancen a reincorporarse algunos de sus elementos como materias primas en nuevos procesos productivos o se valoricen estos residuos disminuyendo su disposición final.

## **1. Análisis de la gestión de residuos peligrosos en el área metropolitana de Bucaramanga en el marco de la Economía Circular**

### **1.1 Planteamiento del problema**

Los residuos peligrosos son aquellos residuos que por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables, infecciosas o radioactivas pueden generar afectaciones a la salud y al ambiente (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015) y, por tanto, requieren procesos de gestión que permitan mitigar dichas afectaciones. No obstante, muchos de estos residuos pueden reincorporarse nuevamente a la cadena productiva si se someten a procesos adecuados de aprovechamiento y/o valorización.

En Colombia se generaron 510.805 toneladas de residuos peligrosos en el año 2017, de acuerdo con la información presentada en el Informe Nacional de Residuos Peligrosos elaborado por el Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales -IDEAM, entidad encargada del análisis y reporte de la información ambiental en el país; de esta cantidad de residuos sólo el 18% fue aprovechada que corresponde a 91.637 toneladas, 76.480 toneladas fueron aprovechadas y/o valorizadas por medio de un tercero (83% del total aprovechado), y 15.158 toneladas fueron manejadas por el generador (17% del total aprovechado %) (IDEAM, 2017). Lo anterior, puede inferir el bajo porcentaje de aprovechamiento y/o valorización que tienen los residuos con características de peligrosidad en el país.

No obstante, la Política Nacional de Residuos Peligrosos formulada en el año 2005 contiene tres líneas estratégicas enfocadas en la prevención de la generación de Residuos Peligrosos a través de la promoción e implementación de estrategias producción más limpia; la reducción de la generación de Residuos Peligrosos en la fuente, mediante la formulación e

implementación de Planes de Gestión Integral y la Promoción del aprovechamiento y valorización Residuos Peligroso (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2005) lo que podría indicar que existen los escenarios para la mejora de modelos de gestión que permitan aumentar los niveles de aprovechamiento de este tipo de residuos en Colombia.

La economía circular podría representar la respuesta para mejorar las actividades actuales de gestión de residuos sólidos en todo el mundo, ya que denota el principio de valorización y reciclaje de residuos para impulsar las economías en desarrollo (Ferronato, et al., 2019), este modelo de economía circular también puede incluir valorización de residuos peligrosos. No obstante, es importante considerar que sustancias peligrosas contenidas también pueden presentar riesgos hasta ahora no identificados debido a las diferentes rutas de exposición y emisión ambiental de las nuevas tecnologías de procesamiento de residuos en comparación con el tratamiento convencional.(Bodar, et al., 2018). Por ende, es importante identificar las técnicas viables para la valorización de residuos que contengan sustancias peligrosas que puedan generar algún tipo de afectación.

El Área Metropolitana de Bucaramanga, conformada por los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta, es el principal centro urbano del departamento de Santander; es por esto, que se considera como el principal generador de residuos o desechos peligrosos en el departamento. De acuerdo con el Plan Metropolitano de Gestión Integral de Residuos Peligrosos y Especiales se estima que se gestionan cerca de 5000 toneladas anuales en los cuatro municipios que la conforman, la cuales podrían tener un potencial de aprovechamiento y ser incorporadas a la cadena productiva nuevamente aplicando el concepto de Economía Circular.

Por lo anterior, es importante plantear las siguientes preguntas ¿es posible aplicar modelos de economía circular para valorizar los residuos peligrosos en el Área Metropolitana de

Bucaramanga? ¿cómo debe ser el modelo de gestión de residuos peligrosos para garantizar su reincorporación a la cadena productiva minimizando aquellas afectaciones que puedan generarse?

## **1.2 Justificación**

A partir de la suscripción del Convenio de Basilea en 1992, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible inicia el proceso de formulación de una política integral que permita la disposición final adecuada los residuos con características de peligrosidad que puedan tener afectaciones a la salud y al ambiente. Asimismo, inicia del proceso de caracterización de los residuos o desechos peligrosos que se generan en el país con el fin establecer las medidas de control y gestión de acuerdo con dichas características de peligrosidad.

La Política Nacional de Residuos o Desechos Peligrosos adoptada en el año 2005 (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2005) tuvo como objetivo principal prevenir la generación de residuos peligrosos así como la promoción en el manejo adecuado de los mismos; no obstante, luego del análisis de su implementación y con las nuevas políticas efectuadas a nivel mundial se estableció la importancia de su actualización enmarcada en líneas estratégicas que adicionalmente se basarán en la búsqueda de procesos eficientes de aprovechamiento y valorización.

Basados en lo anterior con este estudio se busca proponer un modelo de gestión de residuos peligrosos en el Área Metropolitana de Bucaramanga a través del análisis de su generación, así como sus características de peligrosidad. De igual manera, identificando las estrategias ambiental y económicamente viables para la valorización de este tipo de residuos y la aplicación de conceptos de Economía Circular.

### **1.3 Objetivos**

#### ***1.1.1 Objetivo general***

Evaluar la gestión de residuos peligrosos en el área metropolitana de Bucaramanga y su aplicación en procesos de Economía Circular conforme con la política nacional de residuos peligrosos.

#### ***1.1.2 Objetivos específicos***

Categorizar los residuos peligrosos en el área metropolitana de Bucaramanga de acuerdo con lo establecido en los anexos I y II del artículo 2.2.6.1.2.1. del Decreto 1076 de 2015.

Identificar las técnicas de aprovechamiento ambientalmente sostenibles, para los residuos peligrosos potencialmente aprovechables, a través de minería de texto, empleando la base de datos de Scopus (Elsevier, 2023) y el programa especializado VantagePoint (*Search Technology*, Versión académica 15.0).

Proponer la implementación de un modelo de gestión para el manejo de residuos peligrosos generados en el área metropolitana de Bucaramanga que permita la realización de procesos de recuperación y valorización en el marco de la Economía Circular.

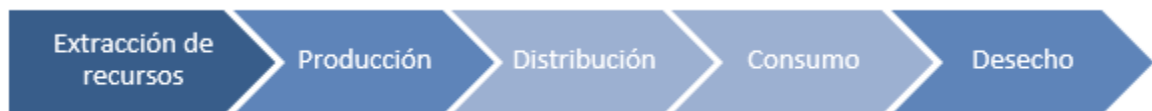
## **2. Marco referencial**

### **2.1 Economía circular**

La economía circular, en siglas EC, es definida como un método para gestionar la circularidad, la eficiencia y la optimización de los recursos que propende por el uso de los desechos

como recursos para generar valor (Ahmed, et al., 2022). Actualmente el mundo sigue un modelo de economía lineal. Es decir, un modelo que consiste en tomar, usar y desechar, según se muestra en la **Figura 1**. Además de contaminar el medio ambiente, este modelo también da como resultado un gran desperdicio y un uso ineficiente de los recursos (Ahmed, et al., 2022). El modelo de economía circular, por otro lado, implica producción, consumo, eliminación de desechos para reciclarlos para una mayor producción, como se puede ver en la Figura 2. y se rige principalmente por el concepto de las 3R, que implican el Reciclaje, Reducción y Reutilización (Manickam y Duraisamy, 2019).

**Figura 1.** *Modelo de economía lineal*



Adaptado de (Ahmed, et al., 2022, p.2)

**Figura 2.** *Modelo de economía circular*



Adaptado de (Ahmed, et al., 2022, p.2)

De acuerdo con la Unión Europea, EU, la economía circular es un modelo de producción y consumo que implica compartir, alquilar, reutilizar, reparar, renovar y reciclar materiales y productos existentes todas las veces que sea posible para crear un valor añadido. De esta forma, el ciclo de vida de los productos se extiende. Aplicado al modelo de consumo, implica reducir los residuos al mínimo. Cuando un producto llega al final de su vida, sus materiales se mantienen dentro de la economía siempre que sea posible. Estos pueden ser productivamente utilizados una y otra vez, creando así un valor adicional. (Parlamento Europeo, 2022).

El Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible – MADS utiliza la definición propuesta por la fundación Ellen McArthur la cual conceptúa la economía circular como “Sistemas de producción y consumo que promueven la eficiencia en el uso de materiales, agua y la energía, teniendo en cuenta la capacidad de recuperación de los ecosistemas, el uso circular de los flujos de materiales y la extensión de la vida útil a través de la implementación de la innovación tecnológica, alianzas y colaboraciones entre actores y el impulso de modelos de negocio que responden a los fundamentos del desarrollo sostenible” (Ministerio Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022).

### ***2.1.1 Principios de la Economía Circular***

La Fundación de economía circular en 2016 indica que la Economía Circular se basa en los principios que se relacionan en la Tabla 1.

**Tabla 1.** *Principios de la Economía Circular*

| <b>Principio</b>                  | <b>Concepto</b>  |
|-----------------------------------|--|
| Eco-concepción                    | Considera los impactos medioambientales a lo largo del ciclo de vida de un producto y los integra desde su concepción.   |
| Ecología industrial y territorial | Establecimiento de un modo de organización industrial en un mismo territorio, caracterizado por una gestión optimizada de los stocks y de los flujos de materiales, energía y servicios. |
| Economía de la funcionalidad      | Privilegiar el uso frente a la posesión y la venta de un servicio frente a la venta de un bien.  |
| Segundo uso                       | Reintroducir en el circuito económico aquellos productos que ya no se corresponden a las necesidades iniciales de los consumidores.  |
| Reutilización                     | Reutilizar ciertos residuos o partes de estos que todavía pueden funcionar para la elaboración de nuevos productos.  |
| Reparación                        | Encontrar una segunda vida a los productos dañados.  |
| Aprovechamiento                   | Aprovechar los materiales que se encuentran en los residuos.   |
| Valorización (tratamiento)        | Aprovechar energéticamente los residuos que no se pueden reciclar.   |

Adaptado de Fundación para la Economía Circular (FEC), 2016.

### 2.1.1 Residuo o Desecho

De acuerdo con el Decreto 1076 de 2015, expedido por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, un residuo sólido es “cualquier objeto, material, sustancia, elemento o producto que se encuentra en estado sólido o semisólido, o es un líquido o gas contenido en recipientes o depósitos, cuyo generador descarta, rechaza o entrega porque sus propiedades no permiten usarlo nuevamente en la actividad que lo generó o porque la legislación o la normatividad vigente así lo estipula” (Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Social, 2015).

Asimismo, de acuerdo con el Parlamento Europeo y en su DIRECTIVA 2008/98/CE define un residuo sólido como “cualquier sustancia u objeto del cual su poseedor se desprenda o tenga la intención o la obligación de desprenderse” (PARLAMENTO EUROPEO y CONSEJO DE LA UNIÓN EUROPEA, 2008).

Los residuos sólidos pueden clasificarse de acuerdo con sus características de peligrosidad en: no peligrosos, peligrosos y especiales según lo contemplado en la GTC 24 (ICONTEC, 2009).

**Tabla 2.** *Clasificación de los residuos sólidos de acuerdo con su peligrosidad*

| <b>Tipo de residuo</b> | <b>Clasificación</b>          |
|------------------------|-------------------------------|
| Residuo no peligroso   | Aprovechables                 |
|                        | No aprovechables              |
|                        | Orgánicos – Biodegradables    |
| Residuo Peligroso      | Conforme al Decreto 1076/2005 |
| Residuo Especial       |                               |

Adaptado de (ICONTEC, 2009)

### ***2.1.1 Residuo Peligroso (RESPEL)***

Los residuos peligrosos son aquellos residuos que “por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables, infecciosas o radiactivas, puede causar riesgos, daños o efectos no deseados, directos e indirectos, a la salud humana y el ambiente. Así mismo, se considerará residuo peligroso los empaques, envases y embalajes que estuvieron en contacto con ellos” (Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Social, 2015).

Los desechos que representan un riesgo para la salud humana y el medio ambiente se consideran como desechos peligrosos e incluyen cualquier material no deseado que sea peligroso o tenga el potencial de serlo. De igual manera, todo el material que pueda causar un daño significativo a la salud y seguridad humana o al medio ambiente si no se maneja adecuadamente es un desecho peligroso. Por tanto, las operaciones inadecuadas de almacenamiento, transporte, tratamiento o eliminación pueden provocar daños. (Xu y Yang, 2022)

Asimismo, el Convenio de Basilea (Convenio de Basilea., 2012) en su artículo 1, serán considerados desechos peligrosos los que tengan las siguientes características:

Serán “desechos peligrosos” a los efectos del presente Convenio los siguientes desechos que sean objeto de movimientos transfronterizos: a) Los desechos que pertenezcan a cualquiera de las categorías enumeradas en el Anexo I, a menos que no tengan ninguna de las características descritas en el Anexo III; y b) Los desechos no incluidos en el apartado a), pero definidos o considerados peligrosos por la legislación interna de la Parte que sea Estado de exportación, de importación o de tránsito.

Los desechos que pertenezcan a cualesquiera de las categorías contenidas en el Anexo II y que sean objeto de movimientos transfronterizos serán considerados “otros desechos” a los efectos del presente Convenio

Los desechos que, por ser radiactivos, estén sometidos a otros sistemas de control internacional, incluidos instrumentos internacionales, que se apliquen específicamente a los materiales radiactivos, quedarán excluidos del ámbito del presente Convenio.

Los desechos derivados de las operaciones normales de los buques, cuya descarga esté regulada por otro instrumento internacional, quedarán excluidos del ámbito del presente Convenio

### ***2.1.2 Características de peligrosidad de los residuos peligrosos***

Considerando que los residuos o desechos peligrosos son aquellos que, por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables, infecciosas o radiactivas, puede causar riesgos, daños o efectos no deseados, directos e indirectos, a la salud humana y el ambiente. (Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Social, 2015). Al igual, que los empaques, envases y embalajes que estuvieron en contacto con ellos.

De acuerdo con el anexo III del Decreto 4741 de 2005, expedido por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible-MADS, se indican las características de peligrosidad para cada tipo de residuos con el fin de identificar las posibles afectaciones a la salud y al ambiente que este pueda tener, así como identificar los posibles procesos que permitan el aprovechamiento y/o tratamiento de estos. En el Apéndice A se relacionan las características de peligrosidad de los residuos sólidos conforme a los análisis fisicoquímicos.

### ***2.1.3 Clasificación de los residuos peligrosos***

De acuerdo con los Anexos I y II de Decreto 4741 de 2005, los residuos peligrosos pueden clasificarse de acuerdo con el proceso o actividad en la cual se generan o considerando su corriente;

es decir, según la caracterización de sus peligrosos. (MINISTERIO DE AMBIENTE, 2005). Por tanto, los generadores y gestores de residuos peligrosos pueden consideración la clasificación de los residuos conforme a las características que se describen en los apéndices B y C.

#### ***2.1.4 Actividades generadoras de residuos peligrosos***

De acuerdo con el informe nacional de generación de residuos o desechos peligrosos publicado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM las actividades generadoras de residuos peligrosos se establecen de acuerdo con la Clasificación industrial internacional uniforme de todas las actividades económicas (CIU) que es publicada por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística -DANE (IDEAM, 2019).

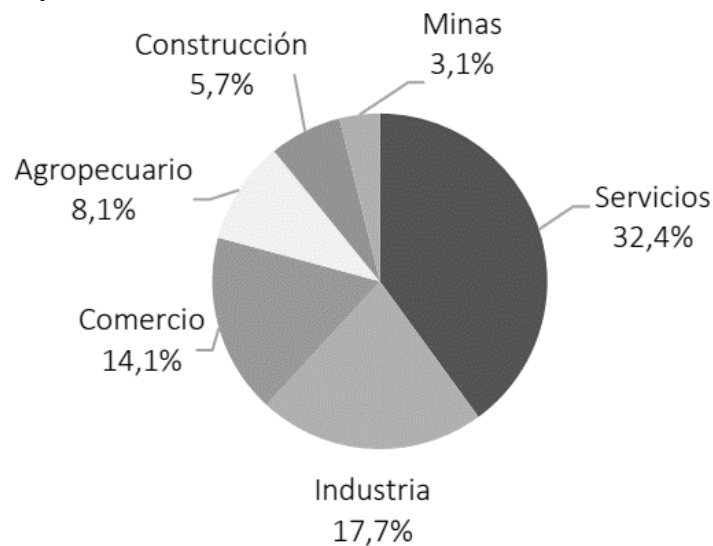
Se resalta que ciertas actividades económicas son consideradas principales actividades generadoras de residuos peligrosos lo que puede inferir una potencial cantidad de estos que se generan de manera permanente. En el apéndice D se describen los rangos CIU y sectores económicos que más contribuyen a la generación de residuos o desechos peligrosos.

La Cámara de Comercio de Bucaramanga en su informe anual Conocer para Transformar: Economía Local Desempeño Territorial 2022 indica que la descomposición del PIB de Santander por sectores económicos refleja un alto grado de diversificación de su aparato productivo, también se advierte que cada una de sus actividades económicas han logrado expandirse considerablemente en las últimas décadas y mantienen un buen nivel de participación en el PIB nacional (Cámara de Comercio de Bucaramanga, 2022).

En la *Figura 3* y *Figura 4* se presentan la distribución de las actividades socioeconómicas más representativas y que potencialmente son generadoras de residuos peligrosos. El sector servicios concentra la mayor proporción con respecto al PIB total del departamento y logró

aumentar su valor en 4,8 veces en los últimos cuarenta años (entre 1981 y 2021); la industria manufactura es el segundo sector económico más importante del departamento, concentra el 9,2% de la industria del país y ocupa el quinto lugar a nivel nacional. El Comercio es la tercera actividad económica de mayor importancia en el PIB de Santander, representa el 14,1% del total y fue el que obtuvo el mayor incremento con relación al año anterior (21,4%). Finalmente, el sector agropecuario ocupa el cuarto lugar en relevancia del PIB de Santander y representa el 8,1% de la producción total del departamento (Cámara de Comercio de Bucaramanga, 2022).

**Figura 3.** PIB de Santander por actividad económica.



Tomado de (Cámara de Comercio de Bucaramanga, 2022).

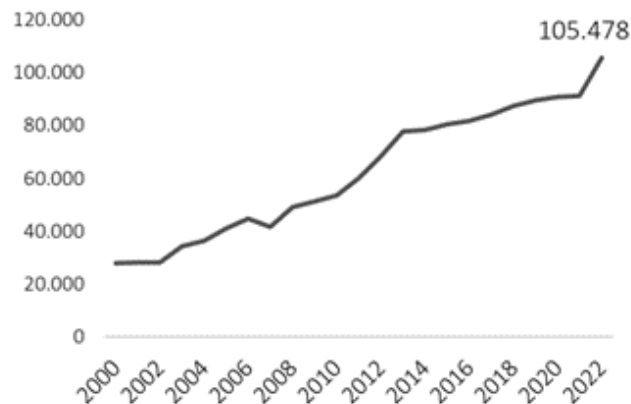
**Figura 4.** Descomposición del sector industria en Santander, año 2021.

Tomado de (Cámara de Comercio de Bucaramanga, 2022).

El área metropolitana de Bucaramanga tiene una participación de 49,7% en el total del valor agregado departamental, regiones que reúnen una población de 1,3 millón de personas, que equivalen al 55,7% de la entidad territorial, condiciones que son explicadas en gran parte por el alto grado de inversión en localidades de mayor tamaño (Cámara de Comercio de Bucaramanga, 2022).

Superado el tema de la pandemia de la covid19, gran parte de las empresas locales lograron mantenerse a flote, adaptándose a cambios significativos en su dinámica productiva. Al corte de agosto de 2022, Santander cuenta con un universo de 105.478 empresas, 4 veces más de las que operaban en el año 2000 y 2 veces con relación al 2010. En el área metropolitana de Bucaramanga se concentra el 72,0% del total de compañías inscritas absorbiendo una gran parte de la mano de obra en la región.(Cámara de Comercio de Bucaramanga, 2022).

Como se muestra en la **Figura 5** es creciente el número de empresas en el área metropolitana de Bucaramanga; y, por ende, los generadores de residuos o desechos peligrosos.

**Figura 5.** *Inventario de empresas activas en Santander*

Tomado de (Cámara de Comercio de Bucaramanga, 2022).

### ***2.1.5 Procesos de aprovechamiento, valorización y tratamiento de residuos peligrosos***

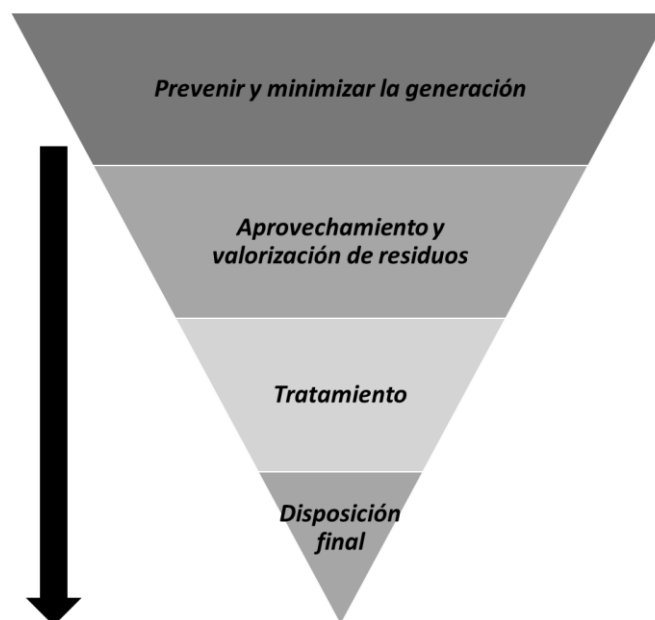
El aprovechamiento y la valorización de residuos peligrosos están relacionados entre sí debido a que constituyen el proceso mediante el cual, a través de un manejo integral de residuos los materiales recuperados se reincorporan a un ciclo económico y productivo en forma eficiente.

La gestión integral de residuos o desechos peligroso incluye las estrategias tendientes a reducir el volumen de estos y el aprovechamiento de sus valores potenciales en forma de materiales recuperables, así como integra la valorización ya sea económica o energética, lo que implica en forma directa la minimización (Naranjo y Castillo, 2006).

Las principales causas de generación de residuos peligrosos radican en la "incompleta transformación de materias primas en distintas partes del proceso productivo, una gran cantidad de materiales que carecen de valor como subproductos"(Rodríguez J, 1999), por lo tanto, la misma constitución de materias primas con variación de impurezas no transformables en productos útiles, establece finalmente la aparición de residuos (Naranjo y Castillo, 2006).

De acuerdo con la Política Nacional de Residuos Peligrosos actualizada en el año 2022 por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible – MADS la gestión integral de residuos sólidos debe enfocarse en la disminución de los procesos de disposición final. Por tanto, se jerarquiza el modelo de gestión como se muestra en la **Figura 6**.

**Figura 6.** *Jerarquización del modelo de gestión de residuos peligrosos*



Adaptado de (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022).

De acuerdo con la jerarquización en el modelo de gestión de los residuos desechos peligrosos es importante que se consideren los procesos de aprovechamiento, tratamiento y/o valorización conforme a las técnicas físicas, químicas o biológicas existentes que tiene como fin la recuperación de los residuos como materias primas en otros procesos industriales o buscar procesos viables técnica, económica y ambientalmente para la recuperación, reutilización o

reciclaje de estos. En el Apéndice E se relacionan los tratamientos físicos, químicos y biológicos usados actualmente para la gestión de los residuos o desechos peligrosos.

### ***2.1.6 Minería de texto***

La minería de texto es una de las herramientas que emplea la vigilancia tecnológica, que a su vez se define como el proceso sistemático en el que se capta, analiza y difunde información de diversa índole -económica, tecnológica, política, social, cultural, legislativa, mediante métodos legales, con el ánimo de identificar y anticipar oportunidades o riesgos, para mejorar la formulación y ejecución de la estrategia de las organizaciones.

La gestión estratégica de la información es cada vez más importante para los negocios considerando lo fundamental que es y sobrevivir en un entorno complejo y cambiante como el actual. Los ciclos de vida de tecnologías y productos se acortan, los mercados se hacen globales, el riesgo tecnológico requiere ser gestionado y la innovación abierta emerge para transformar los modelos de negocio de las organizaciones. Asimismo, Internet permite acceder a una gran cantidad de información que debe ser revisada cuidadosamente. (Santa, 2016)

De igual manera, la vigilancia tecnológica permite identificar oportunidades y amenazas, tomar decisiones estratégicas y lograr mejorar la competitividad en las entidades que la apliquen, lo que se considera fundamental en razón a los cambios que están ocurriendo continuamente en los mercados. (Arango y Fadul, 2012)

En este estudio se pretende identificar un modelo de gestión de residuos o desechos peligrosos que pueda ser adaptado al área metropolitana de Bucaramanga para la aplicación de procesos de Economía Circular mediante técnicas fisicoquímicas de recuperación de materiales provenientes de residuos peligrosos.

### ***2.1.7 Marco legal***

La política Nacional de Residuos o Desechos Peligrosos formulada en el año 2005 pretende mejorar la gestión integral de residuos con características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables, infecciosas y radioactivas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015) fundamentada en la Constitución Nacional de 1991, el Código de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente, la Ley 99 de 1993, la Ley 253 de 1996 que ratifica el Convenio de Basilea sobre el Control de los Movimientos Transfronterizos de Desechos Peligrosos y su Eliminación, la Ley 430 del 16 de enero de 1998, por la cual se dictan normas prohibitivas en materia ambiental referentes a los desechos peligrosos y se dictan otras disposiciones, la Ley 994 de 2005 por la cual se prueba el Convenio de Estocolmo, el Capítulo 20 de la Agenda 21 de la Conferencia de Río de 1992 de las Naciones Unidas y la declaración de la Cumbre de Johannesburgo; y la Política de Producción Más Limpia, principalmente; asimismo, la política se basa en cuatro principios primordiales Prevención y minimización de la generación en el origen, Aprovechamiento y valorización, Tratamiento y Transformación y disposición final que permiten mejorar el manejo que se da a los RESPEL. (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2005).

Conjuntamente, posterior a esto, el gobierno nacional expide, como reglamentación de la Política Nacional de Residuos o Desechos Peligrosos, el Decreto 4741 de 2005 (hoy compilado en el Decreto 1076 de 2015) que establece las condiciones para la gestión integral de estos y con el fin de dar cumplimiento al Plan de Acción planteado.

De igual manera, en el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible -MADS viene adelantando una estrategia dirigida a promover la gestión ambientalmente adecuada de los residuos posconsumo con el fin que sean sometidos a sistemas de gestión diferencial y evitar que la

disposición final se realice de manera conjunta con los residuos de origen doméstico (IDEAM, 2018) y desarrolló las Resoluciones 371 y 372 de 2009, Resoluciones 1511 y 1512 de 2010, Resolución 1326 de 2017 que reglamentan los programas posconsumo de diferentes residuos bajo el concepto de responsabilidad extendida del productor.

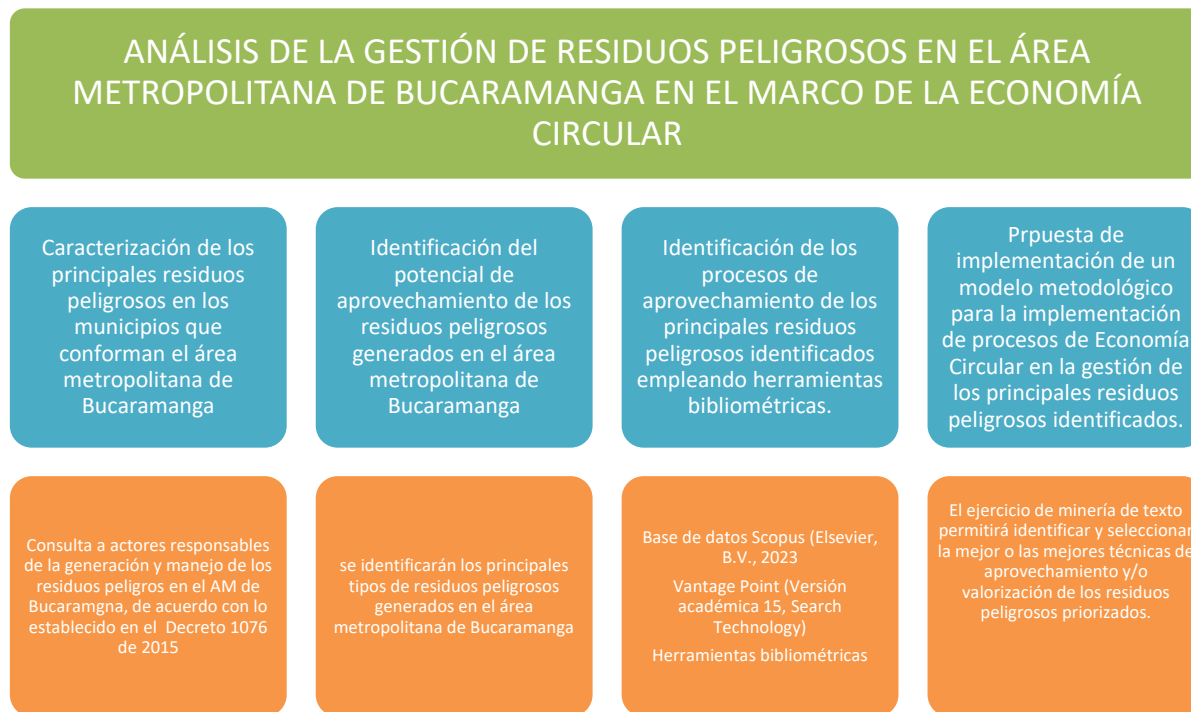
Además, y considerando que el Plan de Acción 2006-2018 de la Política de Residuos Peligrosos plantea la actualización de esta que contendrá como línea estratégica el aprovechamiento y/o valorización de residuos con características de peligrosidad. Lo anterior con el fin de tener concordancia con la actual Política Nacional de Residuos Sólidos – CONPES 3874 de 2016 enfocada en el modelo de Economía Circular.

Finalmente, en el año 2022 el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible -MADS actualiza la política nacional de residuos peligrosos y formula un nuevo plan de acción enfocado al cumplimiento de su objetivo general el cual pretende prevenir la generación de RESPEL y promover el manejo ambientalmente racional de los que se generan con el fin de minimizar los riesgos sobre la salud y el ambiente y de contribuir al desarrollo sostenible y que contempla, además, como estrategia específica la promoción del aprovechamiento y valorización de los RESPEL (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022)

### 3. Método

La investigación se basó en la revisión de artículos científicos para definir teóricamente las mejores técnicas de aprovechamiento y/o valorización de los residuos peligrosos RESPEL (**Figura 7**).

**Figura 7.** Esquema metodológico para el desarrollo del proyecto: Análisis de la gestión de residuos peligrosos en el Área Metropolitana de Bucaramanga en el marco de la economía circular.



A continuación, se describen cada una de las etapas presentadas en el esquema anterior.

### 3.1 Caracterización de los principales residuos peligrosos en los municipios que conforman el área metropolitana de Bucaramanga

Este paso se estableció a través de una consulta con las autoridades competentes y fuentes oficiales el tipo y la cantidad de los residuos peligrosos generados, por personas naturales o jurídicas que desarrollen actividades industriales, comerciales o de servicios, en los municipios que conforman el área metropolitana de Bucaramanga. Asimismo, se clasificaron dichos residuos de acuerdo con lo establecido en los anexos I y II del Título 6 del Decreto 1076 de 2015.

### **3.2 Identificación del potencial de aprovechamiento de los residuos peligrosos generados en el área metropolitana de Bucaramanga**

En este paso se realizó un análisis de la información recopilada y se identificaron los principales tipos de residuos peligrosos generados en el área metropolitana de Bucaramanga y por cada uno de sus municipios, así como sus principales afectaciones a la salud y al ambiente a través de un proceso de revisión bibliográfica. Finalmente, se estableció el potencial de aprovechamiento de cada uno de los residuos de acuerdo con su composición y características de peligrosidad.

### **3.3 Identificación de los procesos de aprovechamiento de los principales residuos peligrosos identificados empleando herramientas bibliométricas.**

El análisis cuantitativo y de minería de texto se realizó siguiendo los lineamientos establecidos en la Norma Española UNE 166066 de 2018, denominada "Sistema de Vigilancia e Inteligencia Competitiva" (

**Figura 8).** Esta norma reconoce la importancia de la Vigilancia e Inteligencia como una herramienta esencial en el sistema de gestión I+D+i, ya que permite la recopilación y análisis de información científica y técnica relevante de la organización en relación con su entorno. El propósito es apoyar la toma de decisiones estratégicas.

**Figura 8..** *Proceso metodológico de la vigilancia tecnológica.*

*Nota:* Adaptado de la Norma UNE 166066 de 2018 “Sistema de Vigilancia e Inteligencia Competitiva”. Unidad de Bibliometría, CRAI-Biblioteca, Universidad Santo Tomás, Seccional Bucaramanga.

De acuerdo con las etapas definidas por la norma se definió el siguiente alcance del ejercicio de minería de texto.

### 3.3.1 Delimitación del sistema a estudiar

El tema de interés se definió en identificar el potencial de aprovechamiento de los residuos peligrosos generados en el área metropolitana de Bucaramanga considerando los principios de economía circular.

### ***3.3.2 Planeación***

La *búsqueda y selección de la literatura*: se realizó mediante una consulta en bases de datos de Scopus (Elsevier, B.V., 2023), utilizando una ecuación de búsqueda con términos que abordan el tema de "*hazardous waste*" y su relación con la economía circular, valorización, reciclaje, recuperación, reutilización, sostenibilidad ecológica, gestión integral de residuos, generación de energía a partir de residuos, minería urbana y otros aspectos relacionados con los residuos electrónicos y equipos eléctricos y electrónicos. Se seleccionaron artículos científicos y el periodo de consulta se definió entre el año 2000 hasta el 2023 (fecha de consulta).

### ***3.3.3 Análisis e información***

Para el análisis de la literatura se obtuvieron indicadores cuantitativos (**Tabla 3**) de actividad científica (artículos) a partir de los documentos indexados en la base de datos empleada. Se empleó el programa especializado para minería de texto *VantagePoint* (versión académica 15,0, *Search Technology*) y el programa de visualización de redes bibliométricas *VOSviewer* (Van Eck y Waltman, 2022), se identificaron tendencias y patrones en la investigación sobre desechos peligrosos asociados con los procesos de economía circular y los diferentes conceptos de valorización y recuperación de estos.

**Tabla 3.** *Indicadores cuantitativos para artículos científicos*

| <b>Vigilancia tecnológica: Indicadores cuantitativos</b> |  |
|--|--|
| <b>Tipo de revisión</b>                                  | Actividad científica   |
| <b>Tipo de documento</b>                                 | Artículos científicos  |
| <b>Bases de datos</b>                                    | Bases de datos tipo referenciales y de texto   |
| <b>Estructurar la ecuación de búsqueda</b>               | Palabras clave, buscar en los <i>keywords</i> , título y <i>abstract</i> del artículo, período de consulta |
| <b>Número de documentos</b>                              | Número de artículos  |
| <b>Dinámica de publicaciones</b>                         | Número de artículos por años   |
| <b>Autores</b>   | Investigadores más importantes en el tema  |
| <b>Afiliación por país</b>                               | Países donde trabajan los investigadores   |
| <b>Afiliaciones por institución</b>                      | Organizaciones de tipo académico, privadas, gubernamentales, públicas                                      |
| <b>En qué tema</b>                                       | Área de conocimiento en la cual tiene su aplicación el trabajo de investigación.                           |
| <b>Dónde se publica</b>                                  | Revistas científicas   |

#### **4. Resultados**

##### **4.1 Caracterización de los principales residuos peligrosos en los municipios que conforman el área metropolitana de Bucaramanga**

Para la determinación de los tipos de residuos o desechos peligrosos generados en los municipios que conforman el área metropolitana de Bucaramanga se tomó información oficial reportada por el Área Metropolitana de Bucaramanga- AMB y la Corporación para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga -CDMB al inventario nacional de residuos o desechos peligrosos reportado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales- IDEAM, a través de los aplicativos RESPEL y RUA Manufacturero.

Asimismo, se consideró lo establecido en el Decreto 4741 de 2005, hoy compilado en el Decreto 1076 de 2015, y por medio de los cuales se establece el modelo de gestión de los residuos o desechos peligrosos.

#### ***4.1.1 Información oficial recopilada***

El IDEAM, como ente encargado de la recopilación de información primaria para la elaboración y publicación de estudios ambientales desde el año 2016, y de manera anual, publica el Informe Nacional de Generación de Residuos o Desechos Peligrosos donde se encuentra compilada la información relacionada con la cantidad y características de dichos residuos generados en el área metropolitana de Bucaramanga. Los datos publicados en el informe anteriormente mencionado son reportados por los generadores de residuos peligrosos y validados por la autoridad ambiental correspondiente, que para el caso del área metropolitana de Bucaramanga desde el año 2016 y hasta el año 2019 corresponde al Área Metropolitana de Bucaramanga-AMB, y posterior a este a la Corporación para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga-CDMB. Además, de información relacionada con la cantidad de residuos el Informe Nacional de Generación de Residuos Peligrosos contiene información relacionada con procesos actuales de aprovechamiento y valorización.

El Área Metropolitana de Bucaramanga formuló el Plan de Gestión Integral de Residuos o Desechos Peligrosos- PGIRESPEL que cuenta con la línea base de generación y gestión de dichos residuos en los municipios que conforman el área metropolitana de Bucaramanga. Finalmente, y considerando la importancia de la línea base se solicitó información adicional recopilada por esta Entidad que fungió hasta 2019 como autoridad ambiental urbana.

#### ***4.1.2 Generación de residuos o desechos peligrosos***

La cantidad de residuos generados en el área metropolitana de Bucaramanga según los Informes Nacionales de generación de Residuos o Desechos Peligrosos para el año 2021, fecha del

último informe fue de 3983,5 toneladas. En la **Tabla 3** se presenta la variación de residuos peligrosos generados desde el año 2016 hasta el año 2021.

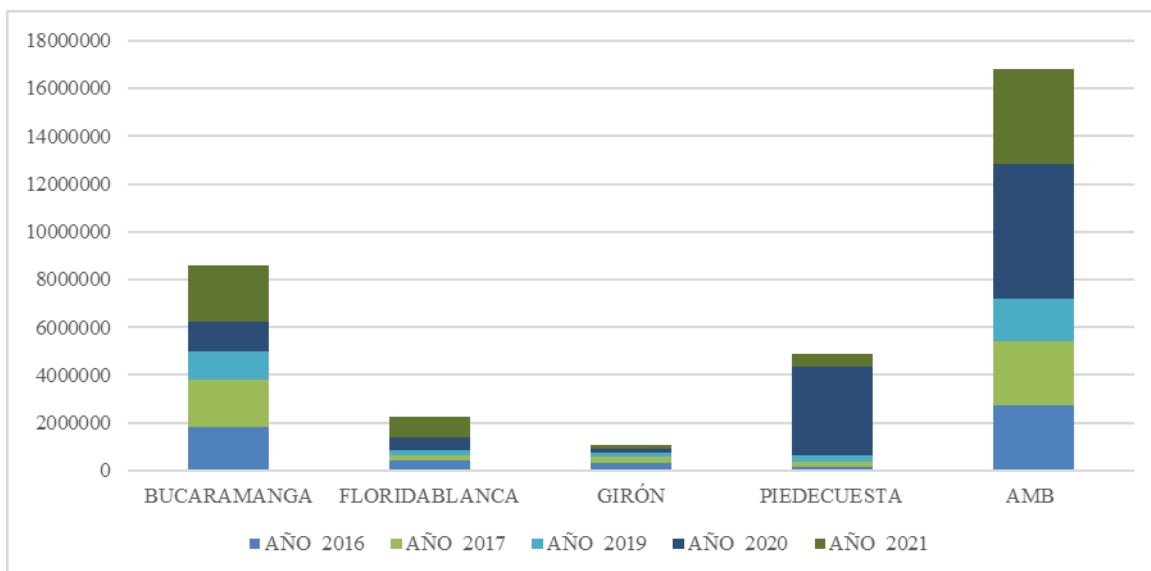
**Tabla 4.** Cantidad de residuos peligrosos generados en el área metropolitana de Bucaramanga durante el periodo comprendido entre 2016-2021.

| TIPO DE RESIDUOS                     | 2016   | 2017   | 2019  | 2020   | 2021   | PROMEDIO ANUAL | % RESIDUO |
|--------------------------------------|--------|--------|-------|--------|--------|----------------|-----------|
| <b>Y1 + A4020</b>                    | 1238,4 | 1019,9 | 799   | 4478,7 | 1886,4 | 1884,48        | 56,04     |
| <b>OTRAS CORRIENTES DE RESIDUOS</b>  | 394,8  | 512,5  | 311,3 | 455,1  | 1263,8 | 587,5          | 17,47     |
| <b>Y31</b>                           | 289,5  | 449,6  | 223,7 | 153,9  | 340,8  | 291,5          | 8,67      |
| <b>Y18</b>                           | 358,3  | 315,9  | 76,4  | 135,9  | 161,3  | 209,56         | 6,23      |
| <b>A1010 + A1160 + A1170 + A1180</b> | 245,8  | 144,6  | 113,8 | 117,9  | 107,7  | 145,96         | 4,34      |
| <b>Y8 + A3020</b>                    | 104,5  | 80,9   | 195,2 | 204,8  | 119,7  | 141,02         | 4,19      |
| <b>Y9 + A4060</b>                    | 80,5   | 206    | 53,3  | 70,8   | 103,8  | 102,88         | 3,06      |

*Nota:* En el Informe Nacional de residuos o desechos peligrosos publicado en el año 2018 no es posible identificar el municipio de procedencia de los residuos por lo cual se excluye del análisis.

A partir de la información recopilada de los informes de generación de residuos peligrosos en el municipio de Bucaramanga se genera cerca del 50% de los residuos peligrosos generados en el área metropolitana de Bucaramanga. No obstante, es importante resaltar que debido a la emergencia sanitaria derivada del Covid-19, los residuos generados durante el año 2020 en el municipio de Piedecuesta representaron el 49% del total de los residuos generados al contar con uno de los centros médicos con mayor capacidad. En la **Figura 9** se muestra la cantidad de residuos generados y su representatividad.

**Figura 9.** Cantidad de residuos o desechos generados en el periodo comprendido entre 2016 y 2021.

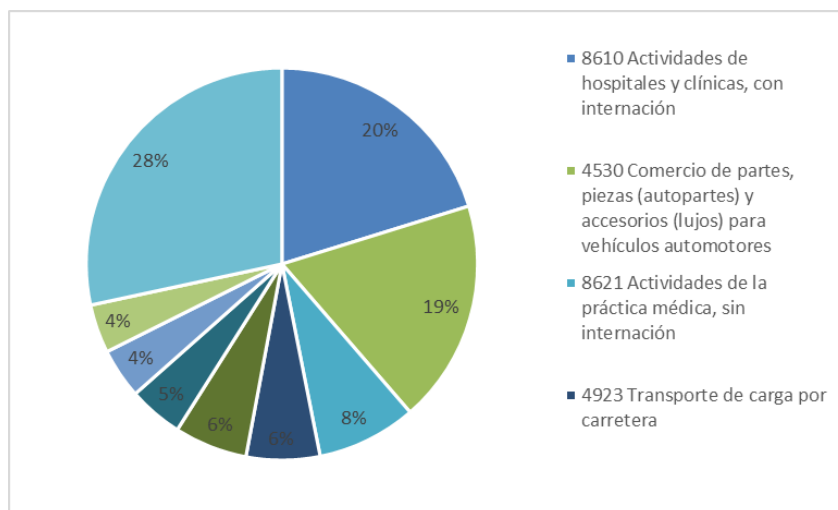


*Nota:* En el Informe Nacional de residuos o desechos peligrosos publicado en el año 2018 no es posible identificar el municipio de procedencia de los residuos por lo cual se excluye del análisis.

Se resalta que la información reportada en el Informe Nacional de generación de residuos o desechos peligrosos corresponde a los generadores de residuos conforme a los establecido a la Resolución 1362 de 2007. Por tanto, las cantidades reportadas solamente corresponde a generadores de más de 10 kg/mes de residuos o desechos peligrosos considerando que son los obligados de acuerdo con la normativa vigente.

En cuanto a las principales actividades generadoras de acuerdo con la información reportada 85 tipos de actividades comerciales reportan información y de estas actividades corresponde el 28% a actividades de hospitales y clínicas, con internación y sin internación; el 19% comercio de partes, piezas y accesorios para vehículos automotores y el 8% transporte de carga por carretera. Es decir, en el área metropolitana de Bucaramanga los generadores de más de 10kg de residuos o desechos peligrosos corresponden principalmente a actividades de la práctica médica, comercio de vehículos, partes, piezas, accesorios y combustible, así como mantenimiento de vehículos (**Figura 10**).

**Figura 10.** Composición de las principales actividades generadoras de residuos o desechos peligrosos



*Nota:* En el Informe Nacional de residuos o desechos peligrosos publicado en el año 2018 no es posible identificar el municipio de procedencia de los residuos por lo cual se excluye del análisis.

En cuanto a los principales tipos de residuos las corrientes principales corresponden a los desechos clínicos, aceites minerales usados, residuos de aparatos eléctricos y electrónicos y desechos que contienen plomo. En la Tabla 5 se presenta la cantidad generada por cada una de las principales corrientes de residuos y conforme a lo establecido en el Decreto 1076 de 2015.

**Tabla 5.** Cantidad de residuos peligrosos generados en el área metropolitana de Bucaramanga durante el periodo comprendido entre 2016-2021.

| TIPO DE RESIDUOS                     | 2016   | 2017   | 2019  | 2020   | 2021   | %<br>RESIDUO |
|--------------------------------------|--------|--------|-------|--------|--------|--------------|
| <b>Y1 + A4020</b>                    | 1238,4 | 1019,9 | 799   | 4478,7 | 1886,4 | 56,04        |
| <b>Y18</b>                           | 358,3  | 315,9  | 76,4  | 135,9  | 161,3  | 8,67         |
| <b>Y31</b>                           | 289,5  | 449,6  | 223,7 | 153,9  | 340,8  | 6,23         |
| <b>A1010 + A1160 + A1170 + A1180</b> | 245,8  | 144,6  | 113,8 | 117,9  | 107,7  | 4,34         |

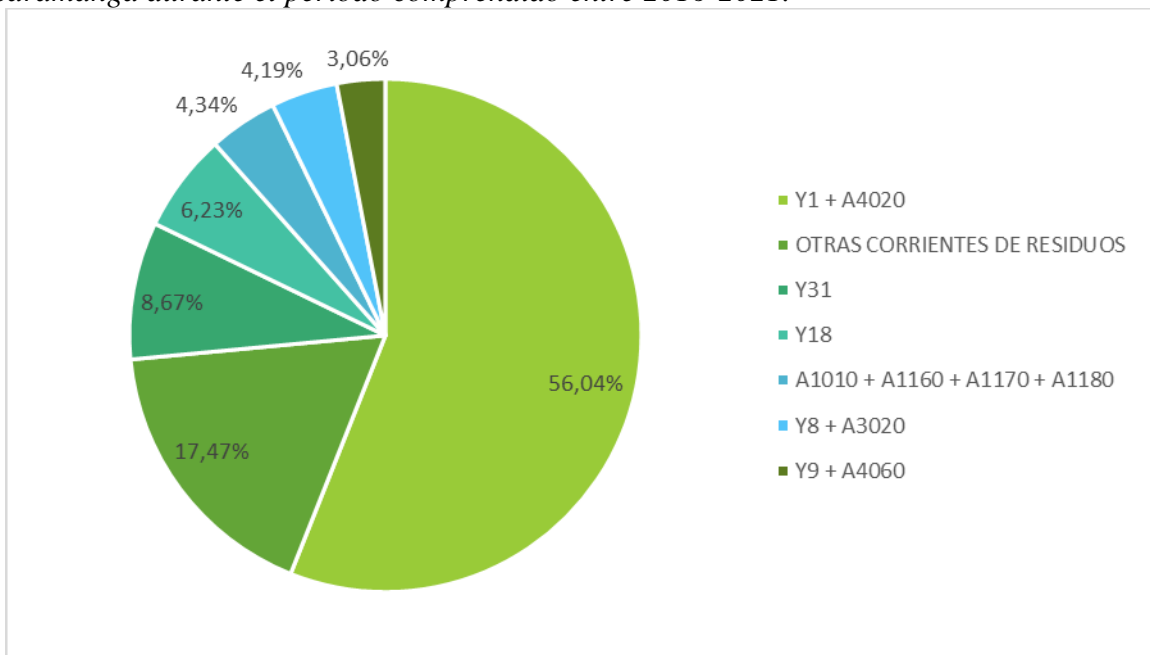
*Nota:* En el Informe Nacional de residuos o desechos peligrosos publicado en el año 2018 no es posible identificar el municipio de procedencia de los residuos por lo cual se excluye del análisis.

Es de resaltar que la corriente Y1 y A4020 durante el año 2020 tuvo un aumento en la generación debido a la emergencia causada por covid19, lo que representa un aumento

significativo en dichos residuos. Cabe resaltar, la importancia de la búsqueda de alternativas de tratamiento y/o valorización para posibles emergencias similares que se presenten con características similares.

En relación con el porcentaje de residuos de mayor generación en el área metropolitana de Bucaramanga el 56,04% corresponde a las corrientes de residuos Y1 y A4020; es decir, residuos generados en actividades de atención en salud y con riesgo principalmente biológico. En segundo lugar, se encuentra con un 8,67% la generación de los residuos de la corriente de residuos Y31, que corresponde a la generación de residuos que contienen plomo; en seguida con porcentajes de 6,23% y 4,34% las corrientes Y18 y A1010+A1160+A1170+A1180 que corresponden a residuos generados en procesos industriales y a residuos que contienen metales pesados y preciosos, respectivamente. Asimismo, en la **Figura 11**

**Figura 11.** *Porcentaje de residuos peligrosos generados en el área metropolitana de Bucaramanga durante el periodo comprendido entre 2016-2021.*



*Nota:* En el Informe Nacional de residuos o desechos peligrosos publicado en el año 2018 no es posible identificar el municipio de procedencia de los residuos por lo cual se excluye del análisis.

En cuanto al aprovechamiento y tratamiento de los residuos se encuentran el reciclado o recuperación de metales y compuestos metálicos para la corriente Y31, la regeneración u otra reutilización de aceites usados para las corrientes Y8 y A3020 y el tratamiento térmico para las corrientes Y1 y A4020. Es importante resaltar que de acuerdo con la información presentada en el informe nacional de residuos o desechos peligrosos el tratamiento térmico sólo consiste en la descomposición del residuo para su disposición final y que este no cuenta con una valorización energética.

Finalmente, en el área metropolitana de Bucaramanga de acuerdo con el diagnóstico presentado en el Plan Metropolitano de Gestión Integral de Residuos o Desechos Peligrosos de las empresas registradas en la Cámara de Comercio de Bucaramanga el 66,11% ubicadas en el municipio de Bucaramanga, el 17,92% en el municipio de Floridablanca, el 8,02% en el municipio de Girón y el 7.95% restante en el municipio de Piedecuesta. (Área Metropolitana de Bucaramanga -AMB, 2018). Asimismo, se indica que el 94% de las empresas corresponden a Mipymes, el 5% a pequeñas empresas y el 1% restante a medianas y grandes empresas (Área Metropolitana de Bucaramanga -AMB, 2018); lo que indica que el reporte que se realiza al registro de generadores de residuos o desechos peligrosos indica cifras muy por debajo de las realmente generadas.

#### **4.2 Identificación del potencial de aprovechamiento de los residuos peligrosos generados en el área metropolitana de Bucaramanga. Minería de texto**

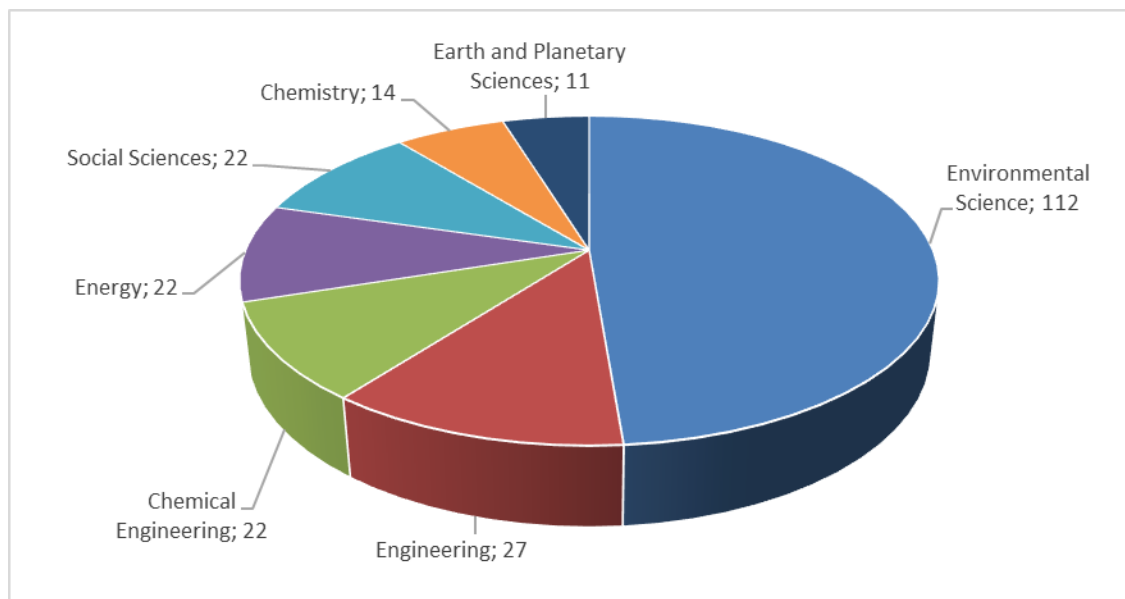
De acuerdo con la ecuación de búsqueda planteada se recuperaron 161 artículos científicos indexados en la base de datos de Scopus durante el periodo 2000 a 2023 (a la fecha de consulta). A continuación, se presentan los indicadores cuantitativos de la actividad científica

identificados relacionados con los residuos peligrosos considerando los principios de economía circular y la valorización de este tipo de desechos.

#### **4.2.1 Áreas de conocimiento**

En la Figura 12, se presenta la distribución de artículos de acuerdo con el área de conocimiento para las investigaciones asociadas al potencial de aprovechamiento de los residuos peligrosos. El área de las *ciencias ambientales* es el de mayor actividad con 112 artículos, lo que indica un interés significativo hacia la identificación de soluciones sostenibles para la gestión de residuos peligrosos. Le sigue el área de la *Ingeniería* con 27 documentos, *Ingeniería Química* con 22 y *Energía* con 22, lo que puede indicar un esfuerzo multidisciplinario para enfrentar los desafíos tecnológicos y de innovación asociados con la transformación de residuos peligrosos en recursos valiosos. La investigación en el área *social* está representada con 22 publicaciones, resaltando las implicaciones sociales y económicas de la gestión de residuos peligrosos, lo que muestra la importancia de la conciencia pública, la regulación y las políticas en la promoción de prácticas de gestión sostenible.

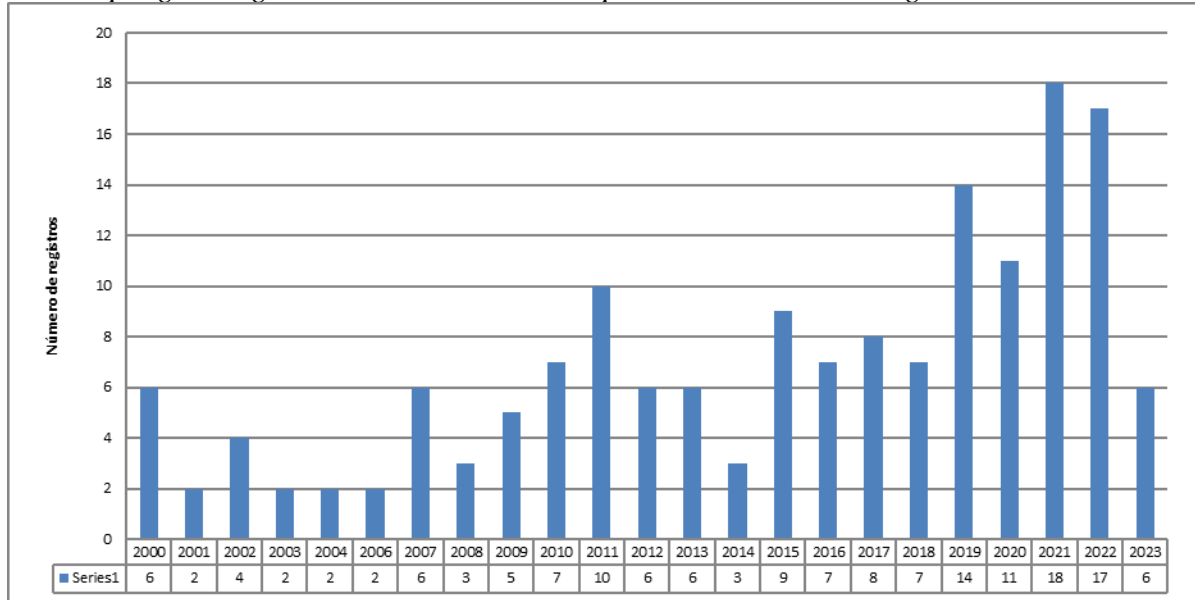
**Figura 12.** *Áreas de conocimiento en las cuales se orienta la investigación relacionada del potencial de aprovechamiento de los residuos peligrosos generados en el área metropolitana de Bucaramanga*



#### 4.2.2 Dinámica científica

La dinámica científica a lo largo de los años se basa en el número de publicaciones por año, revela una evolución en la investigación relacionada con la temática en cuestión. Desde el inicio de la recopilación de datos en el año 2000 hasta el presente, se observa un patrón de crecimiento irregular en la producción científica, con fluctuaciones notables en los registros anuales. Durante los primeros años de la serie, se destacan intervalos con una cantidad relativamente baja de publicaciones, como en los años 2001, 2003, 2004 y 2006. En el 2007, se observa un aumento sostenido en la producción científica. A partir de 2010, se observa una fase de crecimiento más constante, con un incremento gradual en el número de publicaciones por año, alcanzando su punto máximo en el año 2021 con 18 registros. Este aumento en el número de publicaciones puede estar asociado con avances tecnológicos, cambios regulatorios o una mayor conciencia sobre los desafíos relacionados con la gestión de los desechos peligrosos. En lo transcurrido del 2023 se tienen indexados 6 documentos, como se puede apreciar en la **Figura 13**

**Figura 13.** Distribución de artículos por año relacionados con el potencial de aprovechamiento de los residuos peligrosos generados en el área metropolitana de Bucaramanga



#### 4.2.3. Revistas científicas

La divulgación de las investigaciones relacionadas con el potencial de aprovechamiento de los residuos peligrosos considerando los principios de la economía circular se realizó en 116 revistas científicas que se encuentran indexadas en la base de datos de Scopus, dentro de las cuales sobresalen las siguientes:

- *Journal of Hazardous Materials* (13 artículos): Esta revista tiene un enfoque hacia la gestión de materiales peligrosos, lo que sugiere un interés en abordar la transformación, mitigación y gestión de residuos peligrosos. Los artículos publicados pueden orientar su interés a la propuesta de nuevas tecnologías y enfoques para la recuperación de materiales valiosos o la minimización de riesgos asociados con los residuos peligrosos.
- *Journal of Cleaner Production* (5 artículos): Esta revista se centra en la sostenibilidad y la producción limpia, las investigaciones están orientadas a la optimización de los

procesos de producción, reducción de residuos y mejoramiento de la eficiencia en la utilización de recursos.

- *Federal Register* (4 artículos): es una fuente oficial de información y regulaciones gubernamentales, los artículos publicados pueden estar relacionados con políticas y regulaciones en torno a la gestión de residuos peligrosos, como, por ejemplo, la promulgación de normativas más estrictas para el manejo y aprovechamiento seguro de estos residuos.
- *Chinese Journal of Environmental Engineering* (3 artículos): Esta revista aborda investigaciones específicas relacionadas con la ingeniería ambiental en el contexto de China, lo que puede incluir estudios sobre tecnologías de recuperación de materiales y eliminación segura de residuos peligrosos en una de las economías más grandes y de mayor crecimiento del mundo.
- *Process Safety and Environmental Protection* (3 artículos): Dado el enfoque en seguridad y protección ambiental, los artículos en esta revista podrían explorar cómo gestionar de manera segura los residuos peligrosos y minimizar los riesgos asociados con su manejo y tratamiento.
- *Waste Management* (3 artículos) y *Waste Management and Research* (3 artículos): Estas revistas están orientadas a la gestión de residuos pueden estar relacionadas con el tratamiento, la transformación y la eliminación de residuos peligrosos de manera sostenible, eficiente y ambientalmente responsable.

#### **4.2.4 Países**

En cuanto a la distribución de publicaciones por países a nivel mundial se tiene que tanto China como Estados Unidos lideran la lista con un total de 30 publicaciones cada uno. Le siguen España, con 11 artículos, Irán, India y Turquía, que aportan respectivamente 9, 8 y 7 documentos. También contribuyen con investigaciones Francia, Indonesia e Italia, cada uno con 5 publicaciones. A nivel de Latinoamérica se tiene una producción científica muy incipiente en el tema, identificando a Brasil, con un total de 4 publicaciones, seguido por Colombia, con 3 documentos, México, con 2 registros y Chile, con 1 publicación.

#### ***4.2.5 Nube de palabras clave***

En la **Figura 14** se presenta una nube de palabras, también conocida como "*word cloud*", la cual es una representación visual de un conjunto de palabras donde el tamaño de cada palabra está relacionado con su frecuencia o importancia en un texto o conjunto de datos, proporcionando una información visual rápida y fácilmente comprensible sobre las palabras clave más relevantes o comunes en un determinado contexto. Se identificaron los siguientes términos:

- El término "*hazardous waste*" (residuos peligrosos) es el más recurrente, apareciendo en un total de 115 publicaciones con 246 instancias, lo que lo convierte en el punto focal central de la investigación. Esta prevalencia destaca la importancia de abordar la gestión y aprovechamiento de estos residuos.
- Los conceptos de "*Hazardous materials*" (materiales peligrosos) y "*Hazards*" (riesgos) están vinculados directamente con "*hazardous waste*" y presentan 63 y 52 publicaciones respectivamente, con 65 y 52 instancias en conjunto. Esto sugiere un enfoque en la comprensión de los riesgos y características de los materiales peligrosos.

- "*Recycling*" (reciclaje) y "*waste management*" (gestión de residuos) tienen 43 y 48 publicaciones respectivamente, con 73 y 84 instancias en total. Estos términos indican un esfuerzo constante en transformar y gestionar de manera sostenible los residuos peligrosos.
- Los términos "*Waste disposal*" (eliminación de residuos) y "*Waste treatment*" (tratamiento de residuos) se relacionan con 33 y 21 publicaciones respectivamente, con 45 y 26 instancias, lo que resalta la preocupación por encontrar métodos adecuados para la eliminación y tratamiento de residuos peligrosos.
- "*Incineration*" (incineración) y "*landfill*" (vertedero) están presentes en 16 y 17 publicaciones respectivamente, con 32 y 19 instancias. Sugiere un interés en las formas de eliminación y transformación de residuos peligrosos.
- La "*recuperation*" (recuperación) y "*Sustainable development*" (desarrollo sostenible) aparecen en 8 publicaciones cada una, con 10 y 10 instancias respectivamente, indicando una búsqueda de soluciones más responsables y beneficiosas en la gestión de residuos peligrosos.

**Figura 14.** Nube de palabras asociadas con el potencial de aprovechamiento de los residuos peligrosos generados en el área metropolitana de Bucaramanga.



#### 4.2.6 Análisis de co-ocurrencia

En la **Figura 15** se presenta el análisis de co-ocurrencia que muestra la relación entre los términos empleados por los investigadores en el estudio del potencial del aprovechamiento de los residuos peligrosos en el marco de la economía circular.

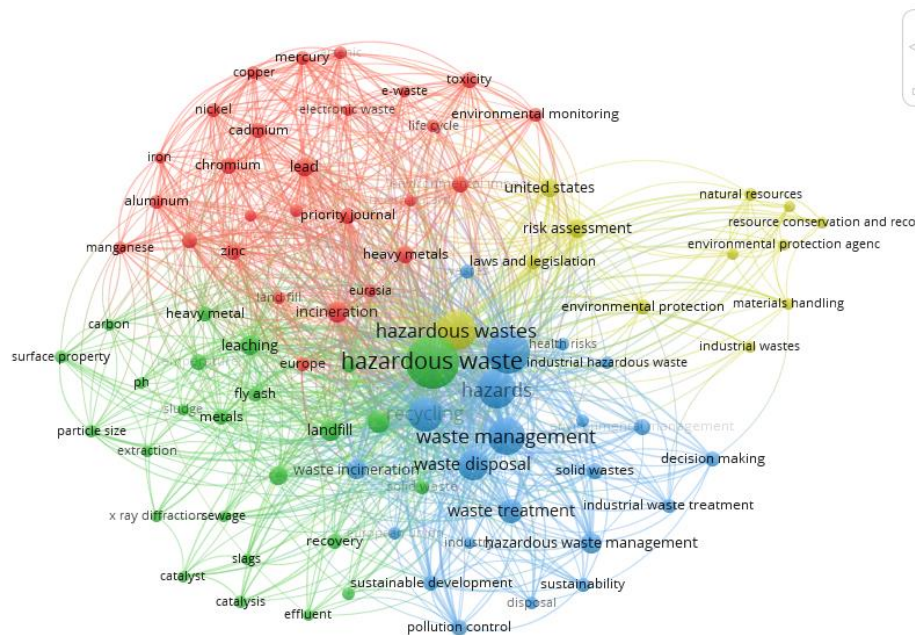
Muchos residuos peligrosos contienen cantidades significativas de metales preciosos, como oro (Au), plata (Ag), cobre (Cu) y platino (Pt). La recuperación de estos metales a través de métodos de reciclaje puede ser económicamente viable y reducir la necesidad de extracción minera. También se identifican metales pesados, como plomo (Pb), cadmio (Cd), cromo (Cr), mercurio (Hg) que causan afectaciones a la salud y al ambiente pero que al recuperarse pueden reincorporarse en nuevos procesos industriales.

Dentro de los procesos de valorización y tratamiento de residuos sólidos peligrosos, en lo que se destacan los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, así como residuos que contengan

metales pesados, se encuentran la pirometalurgia, hidrometalurgia y biometalurgia, que incluye procesos de biolixiviación para la recuperación de diferentes tipos de metales. La incineración controlada de algunos residuos peligrosos puede generar energía térmica utilizada para la generación de electricidad o para la calefacción. Este enfoque reduce el volumen de residuos y aprovecha la energía liberada durante el proceso.

Dentro de los valores experimentales obtenidos durante la caracterización de los residuos que se generan en el área metropolitana de Bucaramanga se encuentran en segundo y tercer lugar residuos que contienen metales en su composición principalmente en residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. Algunos residuos peligrosos pueden ser sometidos a procesos de reciclaje químico para descomponerlos en componentes básicos que puedan ser reutilizados en la fabricación de nuevos productos químicos.

**Figura 15.** Análisis de co-ocurrencia de palabras asociadas con el potencial de aprovechamiento de los residuos peligrosos generados en el área metropolitana de Bucaramanga.



### **4.3 Propuesta de implementación de un modelo metodológico para la aplicación de procesos de Economía Circular en la gestión de los principales residuos peligrosos identificados.**

Para la implementación de modelos de aprovechamiento, tratamiento y/o valorización de los residuos o desechos peligrosos se hace necesaria la identificación de las posibles tecnologías usadas de acuerdo con la naturaleza y tipo de residuo.

A continuación, se presenta el análisis de los artículos científicos pertinentes con el objeto de esta propuesta.

#### **4.3.1 Residuos hospitalarios**

El concepto de residuo hospitalario se refiere a cualquier desecho generado a través del proceso de prestación de servicios de atención médica, como hospitales y clínicas, o en cualquier otro lugar por parte de individuos u hogares.(Ranjbari, et al., 2022). La fracción de residuos peligrosos de los residuos hospitalarios se clasifican en diferentes categorías según el tipo, la fuente y los factores de riesgo relacionados con su manejo, transporte, almacenamiento y disposición final(OMS, 2017).

Debido a las preocupaciones y regulaciones especiales relacionadas con el manejo de residuos peligrosos, con riesgo biológico, el reciclaje puede ser difícil o imposible en algunos componentes de este tipo de residuos. Sin embargo, hay muchos materiales en un centro de atención en salud que se pueden reciclar de manera fácil y segura, lo que genera ahorros ambientales y financieros.(Voudrias, 2018).

Los residuos hospitalarios que comprenden varias corrientes, como desechos infecciosos, punzantes, patológicos, farmacéuticos, químicos, radiactivos y de tipo doméstico no es posible adoptar un enfoque de economía circular en su conjunto, sino solo para componentes de desechos

específicos (Voudrias, 2018). No obstante, se pueden aplicar técnicas de minimización en la generación de este tipo de residuos que permitan disminuir su disposición final.

Se puede lograr una reducción significativa en la generación de residuos hospitalarios no valorizables ni reciclables mediante las siguientes acciones: (1) Reducción de la fuente mediante la compra de materiales y suministros médicos que producen menos desechos, especialmente desechos menos peligrosos. (2) Aplicar buenas prácticas de gestión y control, particularmente en la compra de productos químicos, farmacéuticos y otros insumos. Por tanto, para reducir los costos y la producción de residuos, las instituciones en atención en salud se deben supervisar y optimizar periódicamente sus envases personalizados desechables, eliminando los artículos obsoletos e innecesarios. (3) Aplicar la segregación de residuos en la fuente teniendo en cuenta las diferentes categorías de acuerdo con la legislación, para minimizar las cantidades de flujos de residuos peligrosos, que conllevan un alto costo de gestión. Asimismo, y enmarcado las dos primeras acciones se pueden lograr la implementación de procesos con compras ambientalmente sostenibles de productos y servicios, que producen menos desechos peligrosos y realizar la evaluación del ciclo de vida de cada uno de los suministros. (Voudrias, 2018).

Las tecnologías de tratamiento de residuos hospitalarios como la esterilización por vapor, la desinfección química, el saneamiento por microondas, el reciclaje, la polimerización inversa, la desinfección por calor seco, la autoclave y la incineración se consideran alternativas viables. Sin embargo, algunos estudios destacan que, debido a las ventajas del método de incineración, por ejemplo, la destrucción de bacterias o virus, la reducción del volumen de desechos y el potencial de reutilización de energía, muchos países incineran los residuos hospitalarios. (Trebooniti, 2021). Además, la incineración se utiliza para eliminar entre el 59% y el 60% de los residuos hospitalarios generales en todo el mundo (Li, et al., 2017). Sin embargo, el incinerador de desechos médicos se

considera una fuente clave de dioxinas, furanos y metales pesados según el Convenio de Estocolmo. Por lo tanto, se están desarrollando activamente varias tecnologías para eliminar o reducir estos productos químicos de las cenizas de fondo y las cenizas volátiles. (Voudrias, 2018)

#### 4.3.2 Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos

Los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos son la fuente tanto de materiales peligrosos como de valiosos recursos secundarios. Por tanto, al identificar el potencial de recuperación de valor de este flujo de desechos para diferentes cadenas de suministro permite su valorización. El enfoque de minería urbana emplea soluciones circulares y de reciclaje inspiradas en principios como el metabolismo industrial, la ecología industrial y la economía circular (Xavier, et al., 2023) con el fin de mejorar los procesos industriales y disminuir la cantidad de residuos que van al relleno sanitario. Los procesos de minería urbana buscan recuperar principalmente los metales que se muestran en la **Tabla 6** a partir de procesos físicos, químicos y biológicos de tal manera que puedan entrar a procesos industriales en los cuales puedan

**Tabla 6.** *Tipos de metales recuperables en procesos de minería urbana.*

| Tipo de metal                               | Definición   |
|---|--|
| <b>Metales base o comunes (BM)</b>          | Materiales económicos que están ampliamente disponibles como recursos naturales. Por ejemplo, cobre (Cu), aluminio (Al), níquel (Ni), plomo (Pb), estaño (Sn), zinc (Zn) y hierro (Fe) y acero (aleación de hierro)  |
| <b>Metales preciosos (PM)</b>               | Materiales de alto valor que son escasos como recursos naturales. Los metales preciosos tienen propiedades físicas y químicas, como actividad catalítica, buena conductividad eléctrica y resistencia a la corrosión, por lo que son ampliamente utilizados en la industria. Por ejemplo, oro (Au), plata (Ag) y platino (Pt), indio (In), galio (Ga), paladio (Pd) y cobalto (Co) |
| <b>Metales potencialmente tóxicos (PTM)</b> | Elementos que se encuentran en diversas concentraciones en todos los ecosistemas o liberados de fuentes antropogénicas. Por ejemplo, arsénico  |

| Tipo de metal | Definición  |
|---------------|---|
|               | (As), cadmio (Cd), cobalto (Co), níquel (Ni), plomo (Pb), antimonio (Sb), vanadio (V), zinc (Zn), platino (Pt), paladio (Pd ) y rodio (Rh), y cromo (Cr). |

Adaptado de.(Xavier, et al., 2023)

La recuperación de valor según los conceptos de conversión de residuos en recursos y de conversión de residuos en energía es la columna vertebral de la minería urbana. De esta manera, es posible definir los residuos como los productos post-consumo o materiales sin valor potencial, mientras que los materiales valiosos y recuperables son recursos secundarios, de los cuales se obtienen materiales secundarios. Es necesaria la identificación de las fuentes potenciales de valor a través de técnicas específicas, como el procedimiento de balance de masa.(Xavier, et al., 2023)

#### ***4.3.3 Tecnologías de tratamiento para la recuperación de metales a partir de residuos electrónicos***

Se han desarrollado diferentes técnicas para recuperar productos de valor agregado de los desechos electrónicos, como la pirometalurgia, la hidrometalurgia, la electrometalurgia y la biometalurgia o biolixiviación que se han utilizado con éxito (Kaya, 2016) Además se han desarrollado híbridos de pirometalurgia e hidrometalurgia para lograr la máxima eficiencia y consumo en menos tiempo (Kaya, 2016; Khaliq, 2014). Antes de seguir los procesos, el pretratamiento es el paso principal para maximizar la recuperación de metales de los desechos electrónicos.(Khaliq, 2014)

#### ***4.3.3.1 Pretratamiento***

El tratamiento previo de los desechos electrónicos es esencial, especialmente antes del proceso de lixiviación para mejorar la eficiencia de disolución y reducir el consumo de energía (Dutta, et al., 2023; Naseri, et al., 2022). El pretratamiento incluye técnicas físicas o mecánicas, como desmantelamiento, trituración, tamizado, separación por gravedad, magnética y electrostática, y flotación por espuma y técnicas químicas que incluyen pirólisis y fluidos supercríticos y varios sistemas de solventes (Hsu, et al., 2019). Tras la aplicación de tecnologías de pretratamiento, se siguen los diferentes procesos de recuperación de metales. (Khaliq, 2014)

#### ***4.3.3.2 Pirometalurgia***

El proceso consiste en calentar desechos electrónicos a temperaturas más altas en fundiciones. Los metales no ferrosos y valiosos se lixivian de los desechos electrónicos mediante procesos convencionales, es decir, pirometalurgia. Consiste en varios métodos de paso, como tostado, fundición, cloración, incineración, etc. Usando pirometalurgia, la extracción de Au y Cu se lleva a cabo a partir de dispositivos electrónicos de desecho (Ilyas, et al., 2013; Sun, et al. , 2016 ; Islam, et al., 2020 ).

#### ***4.3.3.3 Hidrometalurgia***

La hidrometalurgia es una de las ramas de la metalurgia extractiva en la que se utilizan soluciones acuosas para la recuperación de metales. La solución acuosa incluye reactivos químicos, como ácidos orgánicos y ácidos inorgánicos para la disolución de los metales presentes en los desechos electrónicos, es decir, la lixiviación de los metales en el solvente y luego el proceso de purificación. El proceso de purificación incluye varias técnicas, como el intercambio iónico, la

extracción por solventes, la precipitación, la cementación, la absorción y la electro-obtención (Birloaga y Vegliò, 2016). Por tanto, la lixiviación química de metales a partir de placas de circuito impreso de desecho se puede realizar por separado para metales base por el precioso o no, mediante el uso de agua regia. Luego, para la purificación de la solución, de acuerdo con los medios de la solución, se pueden aplicar varios procedimientos como precipitación, cementación, intercambio iónico, extracción con solventes, electroobtención y absorción de carbono (Birloaga y Vegliò, 2016; Brandon, et al., 2002).

#### ***4.3.3.4 Biometalurgia***

En este método, se utilizan microorganismos para extraer metales de diferentes fuentes. Los microorganismos oxidan o utilizan el sustrato inorgánico y orgánico para transformar el metal presente, en su forma soluble de donde se puede extraer fácilmente (Dutta, et al., 2023; Ilyas, et al., 2013; Islam, et al., 2020; Priya y Hait, 2017). La biolixiviación es un término común utilizado en biometalurgia en el que los metales preciosos, así como los metales básicos, pueden recuperarse selectivamente (Sohaili, et al., 2012)

#### ***4.3.3.5 Biolixiviación***

La biolixiviación se define como la conversión biológica de compuestos metálicos insolubles presentes en una fuente en su forma soluble en agua (Bindschedler, et al., 2017; Dutta, et al., 2023). En relación con la recuperación de metales a partir de desechos electrónicos, la biolixiviación denota la recuperación de metales selectivos utilizando agentes microbianos. Los principales beneficios de la biolixiviación sobre las técnicas de lixiviación convencionales son la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, costos de producción más baratos,

facilidad de recuperación de metales basada en procesos microbianos, recuperación selectiva de metales, la capacidad de los microbios para producir/reciclar iones férricos útiles en la recuperación de metales selectivos. metales, etc., (Dutta, et al., 2023; Mohammed, et al., 2013)

#### ***4.3.3.6 Biosorción***

En términos de recuperación de metales de los desechos electrónicos, la biosorción se puede definir como el proceso mediante el cual se pueden extraer metales de los desechos electrónicos en términos de su afinidad hacia los materiales de origen biológico. La biomasa microbiana tiene la capacidad de actuar como un sumidero para la recuperación de metales debido a su potencial para unir metales en su pared celular. En este caso, los componentes celulares, pigmentos, polisacáridos extracelulares, acumulación dentro de la célula y metales precipitados dentro y alrededor de las células. Durante el proceso de biosorción, los grupos funcionales, como son OH, COOH, NH<sub>2</sub>, etc., se adhieren a los iones metálicos, ayudando así en la biosorción (Choi y Yun, 2006; Dutta, et al., 2023)

Adicionalmente, la gestión de desechos electrónicos junto con el concepto de economía circular jugará un papel crucial en la economía; ya que este enfoque reduce la cantidad de desechos y mejora la recuperación de materiales valiosos con un final de vida útil más prolongado y reduciendo los riesgos laborales y de salud. Además, el enfoque de economía circular conduce a la creación de empleos y la formalización de la industria del reciclaje. En 2011, la Comisión Europea introdujo las Directivas de Restricción de Sustancias Peligrosas que restringen el uso de diez materiales peligrosos en la fabricación de aparatos eléctricos y electrónicos para garantizar la producción sostenible de aparatos eléctricos y electrónicos con menos impacto ambiental (Rautela, et al., 2021). El concepto de economía circular en la gestión de desechos electrónicos comprende

el diseño y la fabricación de aparatos eléctricos y electrónicos, la máxima utilización de los aparatos eléctricos y electrónicos con las 3R, la reducción de la generación de desechos electrónicos, la extracción urbana de recursos secundarios y la utilización de materiales secundarios para las industrias manufactureras. El método de reciclaje estratégico potencia el crecimiento circular en la industria que, en última instancia, mejora el sustento y el uso sostenible de los recursos.

De igual manera, se han asociado otros conceptos como la tarifa de reciclaje avanzada (TRA), la responsabilidad extendida del productor (REP) así como el concepto de logística inversa (Isernia, et al., 2019). La Economía Circular proporciona un enfoque de la cuna a la cuna para resolver los desafíos de los desechos electrónicos. A través de la TRA y la REP, los productores son responsables de la recolección, el reciclaje, la recuperación y los incentivos para diseñar productos sostenibles que tengan un final de vida más largo (Dutta, et al., 2023).

Finalmente, dentro de las ventajas de la Economía Circular en los sectores aparatos eléctricos y electrónicos pueden considerarse las siguientes:

Mantiene la demanda y la oferta de metales preciosos y raros para la fabricación de productos eléctricos y electrónicos a través de la minería urbana de materiales secundarios de los desechos electrónicos y los restaura para uso futuro (Kinnunen y Kaksonen, 2019)

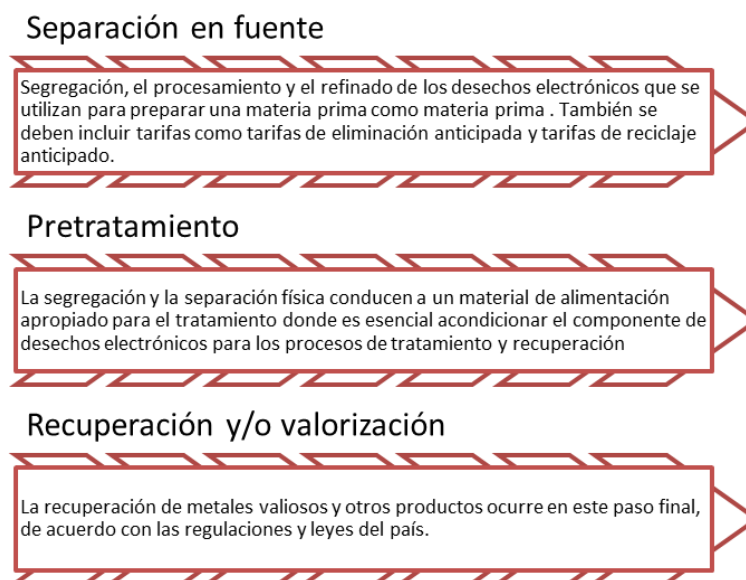
Mejora el concepto de economía verde mediante la creación de puestos de trabajo en cada paso del ciclo de vida del producto. Así como la necesidad de habilidad requerida para tecnologías avanzadas como la biolixiviación es un factor importante para la gestión de desechos electrónicos. La incorporación de expertos y profesionales altamente cualificados fomenta la innovación, la investigación y el desarrollo en el sector de los AEE (H. B. Sharma, et al., 2021)

Una mayor inversión en tecnologías ambientalmente racionales incorpora los sectores de reciclaje formal e informal. Esta integración crea un modelo de negocio que ofrece oportunidades para el desarrollo de capacidades y tecnologías hacia la seguridad de la salud humana y el medio ambiente con la máxima recuperación de recursos (Bozkurt y Stowell, 2016).

La minería urbana de materiales secundarios a partir de desechos electrónicos resuelve el problema de escasez de recursos como los metales. La Economía Circular se enfoca en productos circulares que son rentables y reducen las emisiones que cumplen con los compromisos de cambio climático (Vence y Pereira, 2019)

La segregación inadecuada de desechos electrónicos, incluidos los componentes de naturaleza de metales ferrosos y no ferrosos, conduce a una gran acumulación de diversas sustancias reguladas en entornos urbanos, como se describe anteriormente en los escenarios antes mencionados. Para superar tales problemas, se sigue un ciclo secuencial por pasos para cumplir con el manejo y la gestión adecuados de los desechos electrónicos (Islam, et al., 2020) (*Figura 16*):

**Figura 16.** *Ciclo secuencial para el manejo y la gestión adecuados de los desechos electrónicos*



En la revisión de procesos de aprovechamiento, tratamiento y/o valorización se estableció la relación de posibles tratamientos aplicables al tipo de residuo peligroso generado en el área metropolitana de Bucaramanga y que se resumen en la siguiente Tabla 7

**Tabla 7.** *Identificación de procesos de recuperación y/o valorización de residuos o desechos peligrosos -Revisión Bibliográfica.*

| <b>Aplicaciones</b>            | <b>Autores</b>            | <b>Nombre del artículo</b>  | <b>Recuperación y/o valorización</b> |
|--------------------------------|---------------------------|---|--------------------------------------|
| <b>Producción de energía</b>   | (Gatto, 2023)             | Quantifying management efficiency of energy recovery from waste for the circular economy transition in Europe   | Valorización                         |
| <b>Incineración</b>            | (Cherubini, et al., 2009) | Life cycle assessment (LCA) of waste management strategies: Landfilling, sorting plant and incineration   | Valorización                         |
| <b>Incineración</b>            | (Trebooniti, 2021)        | Thermal Energy Evaluation Of The Incinerator Medical Waste  | Valorización                         |
| <b>Producción de energía</b>   | (Chu, et al., 2023)       | Conversion of medical waste into value-added products using a novel integrated system with tail gas treatment: Process design, optimization, and thermodynamic analysis   | Valorización                         |
| <b>Recuperación de metales</b> | (Choi y Yun, 2006)        | Biosorption of cadmium by various types of dried sludge: An equilibrium study and investigation of mechanisms   | Recuperación                         |
| <b>Reciclaje de metales</b>    | (Dutta, et al., 2023)     | A review on recovery processes of metals from E-waste: A green perspective  | Recuperación                         |
| <b>Recuperación de metales</b> | (Priya y Hait, 2017)      | Comparative assessment of metallurgical recovery of metals from electronic waste with special emphasis on bioleaching   | Recuperación                         |
| <b>Recuperación de metales</b> | (Brandon, et al., 2002)   | Recuperación de metales a partir de chatarra electrónica mediante lixiviación y electro obtención. Reciclaje y tratamiento de residuos en el procesamiento de minerales y metales: aspectos técnicos y económicos | Recuperación                         |
| <b>Recuperación de metales</b> | (Naseri, et al., 2022)    | Manganese bioleaching: an emerging approach for manganese recovery from spent batteries   | Recuperación                         |

#### ***4.3.4 Minería Urbana y sus tendencias en el mercado***

La minería urbana se ha planteado para la recuperación de recursos como materia prima secundaria.(M. Sharma et al., 2021). En los procesos de minería urbana permite la recuperación de metales preciosos y no preciosos de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos y su incursión en nuevas cadenas de valor (Research y Markets, 2022).

De acuerdo con el Informe de pronóstico y perspectiva del mercado mundial de minería urbana 2022-2027 publicado en 2022 publicado por Research and Markets se estima que le mercado de la minería urbana tenga un aumento del 13,12%.; lo que en términos económicos correspondería un aumento de ingresos cercano a los USD 20 millones por dicha actividad.

La minería urbana además de permitir la disminución de residuos en rellenos sanitarios y la recuperación de metales valiosos permite la disminución de los impactos ambientales generados en procesos tradicionales de minería como son el consumo de agua y la emisión de CO<sub>2</sub>. (Research y Markets, 2022)

Países como Alemania, Francia, el Reino Unido e Italia han desarrollado a la fecha políticas públicas para atraer inversiones para promover la minería urbana y el reciclaje. Además, de incluir subsidios e incentivos bajo diversas políticas fiscales y monetarias(Research y Markets, 2022)

Para la implementación de procesos de minería urbana aún se encuentran algunos desafíos por superar como lo son la escasez de tecnología innovadora y conocimiento técnico en los países emergentes y el aumento de la recuperación de metales, particularmente a partir de productos altamente complejos, que pueden resultar en altos costos debido a desafíos técnicos, menor viabilidad económica y una mayor carga ambiental(Research y Markets, 2022)

## 5. Conclusiones

Los residuos peligrosos generados en el área metropolitana de Bucaramanga constituyen un potencial de aprovechamiento y valorización (aproximadamente 3000 toneladas al año) que pueden incluir procesos de generación de energía, a través de procesos eficientes de incineración, así como a través de técnicas de recuperación de metales preciosos y no preciosos como pirometalurgia, hidrometalurgia biolixiviación y biosorción. La implementación de dichas alternativas no sólo permite la disminución de los residuos en vertederos, sino que además permiten la aplicación de procesos de economía circular.

La implementación de modelos adecuados de gestión de residuos sólidos donde se garanticen procesos eficientes de separación en la fuente, recolección selectiva así como pretratamientos apropiados para cada tipo de residuos permitirá una eficiente recuperación de los componentes valiosos de los residuos peligrosos. Se requiere la participación de los generadores en el modelo de gestión que permita la recuperación de los residuos que puedan disponerse de manera adecuada en rellenos sanitarios, así como la implementación de incentivos que permitan en desarrollo de una industria tecnificada para la recuperación y valorización de los componentes de cada tipo de residuo peligroso y su inserción en la cadena de valor.

La realización de posteriores estudios que permitan aumentar procesos de valorización de residuos de las corrientes Y1+A4020 permitirán reincorporar en procesos de economía circular y dar una solución eficiente al manejo de dichos residuos ya que en el área metropolitana de Bucaramanga representa el mayor porcentaje.

La minería urbana muestra una oportunidad para la recuperación de metales preciosos y no preciosos en países emergentes, y, por ende, aplicable en el área metropolitana de Bucaramanga. Lo anterior considerando las tendencias de aumento en el mercado con un crecimiento del 13,12%

lo que representaría oportunidades de crecimiento económico para la región así como la disminución de residuos peligrosos en el relleno sanitario, la disminución de adquisición de materia prima virgen y la implementación adecuada de la política nacional de residuos peligrosos.

### Referencias

- Ahmed, Z., Mahmud, S., y Acet, D. H. (2022). Circular economy model for developing countries: evidence from Bangladesh. In *Heliyon* (Vol. 8, Issue 5). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09530>
- AMVA. (2011). *Guía para la gestión de residuos peligrosos* .
- Área Metropolitana de Bucaramanga -AMB. (2018). *Plan Metropolitano de Gestión Integral de Residuos o Desechos Peligrosos y Especiales*.
- Bindschedler, S., Vu Bouquet, T. Q. T., Job, D., Joseph, E., y Junier, P. (2017). Fungal Biorecovery of Gold From E-waste. *Advances in Applied Microbiology*, 99, 53–81. <https://doi.org/10.1016/BS.AAMBS.2017.02.002>
- Birloaga, I., y Vegliò, F. (2016). Study of multi-step hydrometallurgical methods to extract the valuable content of gold, silver and copper from waste printed circuit boards. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(1), 20–29. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.11.021>
- Bodar, C., Spijker, J., Lijzen, J., Waaijers-van der Loop, S., Luit, R., Heugens, E., Janssen, M., Wassenaar, P., y Traas, T. (2018). Risk management of hazardous substances in a circular economy. *Journal of Environmental Management*, 212, 108–114. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.02.014>
- Bozkurt, Ö., y Stowell, A. (2016). Skills in the green economy: recycling promises in the <sc>UK</sc> e-waste management sector. *New Technology, Work and Employment*, 31(2), 146–160. <https://doi.org/10.1111/ntwe.12066>
- Brandon, N., Kelsall, G., Schmidt, M., y Yin, Q. (2002). *Recuperación de metales a partir de chatarra electrónica mediante lixiviación y electroobtención. Reciclaje y tratamiento de*

*residuos en el procesamiento de minerales y metales: aspectos técnicos y económicos*, . 16–20.

Cámara de Comercio de Bucaramanga. (2022). *CONOCER PARA TRANSFORMAR: Diagnóstico Socioeconómico de Santander*.

Cherubini, F., Bargigli, S., y Ulgiati, S. (2009). Life cycle assessment (LCA) of waste management strategies: Landfilling, sorting plant and incineration. *Energy*, 34(12), 2116–2123. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.08.023>

Choi, S. B., y Yun, Y. S. (2006). Biosorption of cadmium by various types of dried sludge: An equilibrium study and investigation of mechanisms. *Journal of Hazardous Materials*, 138(2), 378–383. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2006.05.059>

Chu, Y. T., Zhou, J., Ren, J., Shen, W., y He, C. (2023). Conversion of medical waste into value-added products using a novel integrated system with tail gas treatment: Process design, optimization, and thermodynamic analysis. *Journal of Hazardous Materials*, 455. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131551>

CONPES, C. N. de P. E. y S. (2018). CONPES 3874-Politica Nacional Para La Gestión Integral De Residuos Solidos. *Departamento Nacional de Planeación*, 73. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Económicos/3874.pdf>

Convenio de Basilea. (2012). *Control de los movimientos transfronterizos de desechos peligrosos. PNUMA*. .

Dutta, D., Rautela, R., Gujjala, L. K. S., Kundu, D., Sharma, P., Tembhare, M., y Kumar, S. (2023). A review on recovery processes of metals from E-waste: A green perspective. In *Science of the Total Environment* (Vol. 859). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160391>

Enrique, J., y Navas, R. (2005). *CARACTERIZACIÓN DEL POBLAMIENTO Y LA METROPOLIZACIÓN DEL TERRITORIO DEL ÁREA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA*.

Ferronato, N., Rada, E. C., Gorritty Portillo, M. A., Cioca, L. I., Ragazzi, M., y Torretta, V. (2019). Introduction of the circular economy within developing regions: A comparative analysis of advantages and opportunities for waste valorization. *Journal of Environmental Management*, 230(October 2018), 366–378. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.09.095>

Gatto, A. (2023). Quantifying management efficiency of energy recovery from waste for the circular economy transition in Europe. *Journal of Cleaner Production*, 414. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136948>

Hsu, E. , Barmak, K. , Oeste, C., y Park, A.-H. (2019). Advancements in the treatment and processing of electronic waste with sustainability: A review of metal extraction and recovery technologies(Review). *Green Chemistry*, 21(5), 919–936.

ICONTEC, I. C. de N. T. y C. (2009). *GCT 24 - GESTIÓN AMBIENTAL. RESIDUOS SÓLIDOS. GUÍA PARA LA SEPARACIÓN EN LA FUENTE*.

IDEAM. (2017). *Informe Nacional de Gestión de Residuos o Desechos Peligrosos en Colombia. Año 2017*. 1–82.

IDEAM. (2019). *Informe Nacional de Generación de Residuos o Desechos Peligrosos 2019*.

Ilyas, S., Lee, J. C., y Chi, R. A. (2013). Bioleaching of metals from electronic scrap and its potential for commercial exploitation. *Hydrometallurgy*, 131–132, 138–143. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2012.11.010>

Islam, A., Ahmed, T., Awual, M. R., Rahman, A., Sultana, M., Aziz, A. A., Monir, M. U., Teo, S. H., y Hasan, M. (2020). Advances in sustainable approaches to recover metals from e-waste-

- A review. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 244). Elsevier Ltd.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118815>
- Kaya, M. (2016). Recovery of metals and nonmetals from electronic waste by physical and chemical recycling processes. In *Waste Management* (Vol. 57, pp. 64–90). Elsevier Ltd.  
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.08.004>
- Khaliq, A. , R. M. A. , B. G. , M. S. (2014). Metal extraction processes for electronic waste and existing industrial routes: A review and Australian perspective(Review). *Resources*, 3(1), 152–179.
- Kinnunen, P. H. M., y Kaksonen, A. H. (2019). Towards circular economy in mining: Opportunities and bottlenecks for tailings valorization. *Journal of Cleaner Production*, 228, 153–160. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.171>
- Krook, J., Svensson, N., y Wallsten, B. (2015). Urban infrastructure mines: On the economic and environmental motives of cable recovery from subsurface power grids. *Journal of Cleaner Production*, 104, 353–363. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.071>
- Li, J., Lv, Z., Du, L., Li, X., Hu, X., Wang, C., Niu, Z., y Zhang, Y. (2017). Emission characteristic of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and polychlorinated dibenzofurans (PCDD/Fs) from medical waste incinerators (MWIs) in China in 2016: A comparison between higher emission levels of MWIs and lower emission levels of MWIs. *Environmental Pollution*, 221, 437–444.  
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.009>
- Manickam, P., y Duraisamy, G. (2019). 3Rs and circular economy. In *Circular Economy in Textiles and Apparel* (pp. 77–93). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102630-4.00004-2>

Ministerio Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022). *Estrategia Nacional de Economía Circular*.

[Https://Economiacircular.Minambiente.Gov.Co/](https://Economiacircular.Minambiente.Gov.Co/).

MINISTERIO DE AMBIENTE, V. Y. D. T. (2005). *Decreto 4741 de 2005 "Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral"*.

Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (2005). *Política Ambiental para la Gestión Integral de Residuos o Desechos Peligrosos*.  
[https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/sustancias\\_químicas\\_y\\_residuos\\_peligrosos/Politica\\_Residuos\\_peligrosos.pdf](https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/sustancias_químicas_y_residuos_peligrosos/Politica_Residuos_peligrosos.pdf)

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Decreto No. 1076 de 2015, Por el cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. *26 De Mayo De 2015*, 53, 654. [https://doi.org/Diario Oficial No. 49.523](https://doi.org/Diario%20Oficial%20No.%2049.523)

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022). *Política ambiental para la gestión integral de residuos peligrosos y Plan de Acción 2022-2030*. In *ISBN impreso: 978-958-5551-79-4* .

Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Social. (2015). Decreto 1076 de 2015, Decreto Unico Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. *Diario Oficial*, 1(53), 654.  
<http://www.parquesnacionales.gov.co/portal/wp-content/uploads/2013/08/Decreto-Unico-Reglamentario-Sector-Ambiental-1076-Mayo-2015.pdf>

Mohammed, Oyeleke, S. B., Ndamitso, Achife, C. E., Badeggi, U. M., y Abstract- (2013). The Impact of Electronic Waste Disposal and Possible Microbial and Plant Control. In *The International Journal Of Engineering And Science (IJES)*. [www.theijes.com](http://www.theijes.com)

- Naranjo, A., y Castillo, J. (2006). *Selección de alternativas de aprovechamiento y valorización de residuos peligrosos generados en la industria colombiana de Llantas S.A. - Michelín, Planta Chusacá*. [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_ambiental\\_sanitaria](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria)
- Naseri, T., Fatemeh, P., Seyyed, M., Mousavi, A. H., y Kaksonen y Kerstin Kuchta. (2022). Manganese bioleaching: an emerging approach for manganese recovery from spent batteries. *Environ Sci Biotechnol*, 1(21), 447–468.
- OMS. (2017). Rep. Gestión de Residuos Sanitarios Pruebas de estado. *Registro Del Sudeste Asiático*.
- Parlamento Europeo. (2022). Economía circular: definición, importancia y beneficios. *20151201STO05603*.
- PARLAMENTO EUROPEO, y CONSEJO DE LA UNIÓN EUROPEA. (2008). DIRECTIVA 2008/98/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas. *Diario Oficial de La Unión Europea*.
- Priya, A. , y Hait, S. (2017). Comparative assessment of metallurgical recovery of metals from electronic waste with special emphasis on bioleaching. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(8), 6989–7008.
- Ranjbari, M., Shams Esfandabadi, Z., Shevchenko, T., Chassagnon-Haned, N., Peng, W., Tabatabaei, M., y Aghbashlo, M. (2022). Mapping healthcare waste management research: Past evolution, current challenges, and future perspectives towards a circular economy transition. *Journal of Hazardous Materials*, 422. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126724>

- Rautela, R., Arya, S., Vishwakarma, S., Lee, J., Kim, K. H., y Kumar, S. (2021). E-waste management and its effects on the environment and human health. *Science of The Total Environment*, 773, 145623. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.145623>
- Research and Markets. (2022). *Urban Mining Market*.
- Rodríguez J, J. J., y 'Irabien G, Á. (1999). Los residuos peligrosos: Caracterización, tratamiento y gestión. *Síntesis*.
- Sharma, H. B., Vanapalli, K. R., Samal, B., Cheela, V. R. S., Dubey, B. K., y Bhattacharya, J. (2021). Circular economy approach in solid waste management system to achieve UN-SDGs: Solutions for post-COVID recovery. In *Science of the Total Environment* (Vol. 800). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149605>
- Sharma, M., Joshi, S., y Govindan, K. (2021). Issues and solutions of electronic waste urban mining for circular economy transition: An Indian context. *Journal of Environmental Management*, 290. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112373>
- Sohaili, J. , Muniyandi, S. K., y Mohamad, S. S. (2012). A review on printed circuit boards waste recycling technologies and reuse of recovered nonmetallic materials. *Int. J. Sci. Eng. Res.*, 3(2), 1–7.
- Tecnalia - Departamento Nacional de Planeación. (2018). *Estudio en la intensidad de utilización de materiales y economía circular en Colombia*. 121. [https://www.dnp.gov.co/Crecimiento-Verde/Documents/ejes-tematicos/Circular/MATEC Producto 3.pdf](https://www.dnp.gov.co/Crecimiento-Verde/Documents/ejes-tematicos/Circular/MATEC%20Producto%203.pdf)
- Trebooniti, K. (2021). THERMAL ENERGY EVALUATION OF THE INCINERATOR MEDICAL WASTE. *International Journal of GEOMATE*, 20(81), 112–117.

- Vence, X., y Pereira, Á. (2019). Eco-innovation and Circular Business Models as drivers for a circular economy. *Contaduria y Administracion*, 64(1).  
<https://doi.org/10.22201/fca.24488410e.2019.1806>
- Voudrias, E. A. (2018). Healthcare waste management from the point of view of circular economy. In *Waste Management* (Vol. 75, pp. 1–2). Elsevier Ltd.  
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.04.020>
- Xavier, L. H., Ottoni, M., y Abreu, L. P. P. (2023). A comprehensive review of urban mining and the value recovery from e-waste materials. In *Resources, Conservation and Recycling* (Vol. 190). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106840>
- Xu, X., y Yang, Y. (2022). Municipal hazardous waste management with reverse logistics exploration. *Energy Reports*, 8, 4649–4660. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.02.230>

## Apéndices

**Apéndice A.** *Características y propiedades que le confieren peligrosidad a un residuo o desecho*

| Tipo de residuo  | Característica principal  | Propiedades  |
|------------------|---|--|
| <b>Corrosivo</b> | Aquel residuo o desecho que, “por acción química, pueda causar daños graves en los tejidos vivos que estén en contacto o en caso de fuga puede dañar gravemente otros materiales                                  | a) Ser acuoso y presentar un pH menor o igual a 2 o mayor o igual a 12.5 unidades;<br>b) Ser líquido y corroer el acero a una tasa mayor de 6.35 mm por año a una temperatura de ensayo de 55 C.   |
| <b>Reactivo</b>  | Al mezclarse o ponerse en contacto con otros elementos, compuestos, sustancias o residuos tiene cualquiera de las propiedades. <sup>a</sup>   | a) Generar gases, vapores y humos tóxicos en cantidades suficientes para provocar daños a la salud humana o al ambiente cuando se mezcla con agua;<br>b) Poseer, entre sus componentes, sustancias tales como cianuros, sulfuros, peróxidos orgánicos que, por reacción, liberen gases, vapores o humos tóxicos en cantidades suficientes para poner en riesgo la salud humana o el ambiente;<br>c) Ser capaz de producir una reacción explosiva o detonante bajo la acción de un fuerte estímulo inicial o de calor en ambientes confinados;<br>d) Aquel que produce una reacción endotérmica o exotérmica al ponerse en contacto con el aire, el agua o cualquier otro elemento o sustancia;<br>e) Provocar o favorecer la combustión. |
| <b>Explosivo</b> | Aquel que, en estado sólido o líquido de manera espontánea, por reacción química, puede desprender gases a una temperatura, presión y velocidad tales que puedan ocasionar daño a la salud humana y/o al ambiente | a) Formar mezclas potencialmente explosivas con el agua;<br>b) Ser capaz de producir fácilmente una reacción o descomposición detonante o explosiva a temperatura de 25 C y presión de 1.0 atmósfera;  |

| Tipo de residuo   | Característica principal  | Propiedades   |
|-------------------|---|---|
| <b>Inflamable</b> | Aquel que, en presencia de una fuente de ignición, puede arder bajo ciertas condiciones de presión y temperatura.   | <p>c) Ser una sustancia fabricada con el fin de producir una explosión o efecto pirotécnico.”</p> <p>a) Ser un gas que a una temperatura de 20C y 1.0 atmósfera de presión arde en una mezcla igual o menor al 13% del volumen del aire;</p> <p>b) Ser un líquido cuyo punto de inflamación es inferior a 60C de temperatura, con excepción de las soluciones acuosas con menos de 24% de alcohol en volumen;</p> <p>e) Ser un sólido con la capacidad bajo condiciones de temperatura de 25C y presión de 1.0 atmósfera, de producir fuego por fricción, absorción de humedad o alteraciones químicas espontáneas y quema vigorosa y persistentemente dificultando la extinción del fuego;</p> <p>d) Ser un oxidante que puede liberar oxígeno y, como resultado, estimular la combustión y aumentar la intensidad del fuego en otro material.</p> |
| <b>Infeccioso</b> | Contiene agentes patógenos; los agentes patógenos son microorganismos (tales como bacterias, parásitos, virus, rickettsias y hongos) y otros agentes tales como priones, con suficiente virulencia y concentración como para causar enfermedades en los seres humanos o en los animales.                            |   |
| <b>Tóxico</b>     | Aquel que, su capacidad de provocar efectos biológicos indeseables o adversos puede causar daño a la salud humana y/o al ambiente. Para este efecto se consideran tóxicos los residuos o desechos que se clasifican de acuerdo con los criterios de toxicidad (efectos agudos, retardados o crónicos y ecotóxicos). | <p>Las autoridades competentes establecerán los límites de control correspondiente:</p> <p>a) Dosis letal media oral (DL50) para ratas menor o igual a 200 mg/kg para sólidos y menor o igual a 500 mg/kg para líquidos, de peso corporal;</p>  |

| Tipo de residuo | Característica principal | Propiedades  |
|-----------------|--------------------------|--|
|                 |                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>b) Dosis letal media dérmica (DL50) para ratas menor o igual de 1.000 mg/kg de peso corporal;</li> <li>e) Concentración letal media inhalatoria (CL50) para ratas menor o igual a 10 mg/l;</li> <li>d) Alto potencial de irritación ocular, respiratoria y cutánea, capacidad corrosiva sobre tejidos vivos;</li> <li>e) Susceptibilidad de bioacumulación y biomagnificación en los seres vivos y en las cadenas tróficas;</li> <li>f) Carcinogenicidad, mutagenicidad y teratogenicidad;</li> <li>g) Neurotoxicidad, inmunotoxicidad u otros efectos retardados;</li> <li>h) Toxicidad para organismos superiores y microorganismos terrestres y acuáticos;</li> <li>i) Otros que las autoridades competentes definan como criterios de riesgo de toxicidad humana o para el ambiente.</li> </ul> |

*Nota: La tabla muestra la clasificación general de los residuos sólidos conforme a peligrosidad. Adaptado de Decreto 4741 de 2005 "Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral"(MINISTERIO DE AMBIENTE, 2005)*

*a. Las propiedades son las descritas en la Columna C - Propiedades*

**Apéndice B.** *Clasificación del residuos o desechos peligrosos de acuerdo con la actividad que lo genera.*

| <b>TIPO DE RESIDUO</b> | <b>DESCRIPCIÓN</b>   |
|------------------------|--|
| <b>Y1</b>              | Desechos clínicos resultantes de la atención médica prestada en hospitales, centros médicos y clínicas.  |
| <b>Y2</b>              | Desechos resultantes de la producción y preparación de productos farmacéuticos.  |
| <b>Y3</b>              | Desechos de medicamentos y productos farmacéuticos.  |
| <b>Y4</b>              | Desechos resultantes de la producción, la preparación y la utilización de biocidas y productos fitofarmacéuticos.  |
| <b>Y5</b>              | Desechos resultantes de la fabricación, preparación y utilización de productos químicos para la preservación de la madera.   |
| <b>Y6</b>              | Desechos resultantes de la producción, la preparación y la utilización de disolventes orgánicos.   |
| <b>Y7</b>              | Desechos que contengan cianuros, resultantes del tratamiento térmico y las operaciones de temple.  |
| <b>Y8</b>              | Desechos de aceites minerales no aptos para el uso a que estaban destinados.   |
| <b>Y9</b>              | Mezclas y emulsiones de desechos de aceite y agua o de hidrocarburos y agua.   |
| <b>Y10</b>             | Sustancias y Artículos de desecho que contengan, o estén contaminados por, bifenilos policlorados (PCB), terfenilos policlorados (PCT) o bifenilos polibromados (PBB). |
| <b>Y11</b>             | Residuos alquitranados resultantes de la refinación, destilación o cualquier otro tratamiento pirolítico.  |
| <b>Y12</b>             | Desechos resultantes de la producción, preparación y utilización de tintas, colorantes, pigmentos, pinturas, lacas o barnices.   |

| <b>TIPO DE RESIDUO</b>                          | <b>DESCRIPCIÓN</b>  |
|---|---|
| <b>Y13</b>                                      | Desechos resultantes de la producción, preparación y utilización de resinas, látex, plastificantes o colas y adhesivos.   |
| <b>Y14</b>                                      | Sustancias químicas de desecho, no identificadas o nuevas, resultantes de la investigación y el desarrollo o de las actividades de enseñanza y cuyos efectos en el ser humano o el medio ambiente no se conozcan. |
| <b>Y15</b>                                      | Desechos de carácter explosivo que no estén sometidos a una legislación diferente.  |
| <b>Y16</b>                                      | Desechos resultantes de la producción; preparación y utilización de productos químicos y materiales para fines fotográficos.  |
| <b>Y17</b>                                      | Desechos resultantes del tratamiento de superficie de metales y plásticos.  |
| <b>Y18</b>                                      | Residuos resultantes de las operaciones de eliminación de desechos industriales.  |
| <b>Desechos que tengan como constituyentes:</b> |   |
| <b>Y19</b>                                      | Metales carbonilos.   |
| <b>Y20</b>                                      | Berilio, compuestos de berilio  |
| <b>Y21</b>                                      | Compuestos de cromo hexavalente.  |
| <b>Y22</b>                                      | Compuestos de cobre.  |
| <b>Y23</b>                                      | Compuestos de zinc.   |
| <b>Y24</b>                                      | Arsénico, compuestos de arsénico.   |
| <b>Y25</b>                                      | Selenio, compuestos de selenio.   |
| <b>Y26</b>                                      | Cadmio, compuestos de cadmio.   |

| <b>TIPO DE RESIDUO</b> | <b>DESCRIPCIÓN</b>   |
|------------------------|--|
| Y27                    | Antimonio, compuestos de antimonio.                                    |
| Y28                    | Telurio, compuestos de telurio.  |
| Y29                    | Mercurio, compuestos de mercurio.                                      |
| Y30                    | Talio, compuestos de talio.  |
| Y31                    | Plomo, compuestos de plomo.  |
| Y32                    | Compuestos inorgánicos de flúor, con exclusión del fluoruro cálcico    |
| Y33                    | Cianuros inorgánicos.  |
| Y34                    | Soluciones ácidas o ácidos en forma sólida.                            |
| Y35                    | Soluciones básicas o bases en forma sólida.                            |
| Y36                    | Asbesto (polvo y fibras).  |
| Y37                    | Compuestos orgánicos de fósforo.                                       |
| Y38                    | Cianuros orgánicos.  |
| Y39                    | Fenoles, compuestos fenólicos, con inclusión de clorofenoles.          |
| Y40                    | Éteres.  |
| Y 41                   | Solventes orgánicos halogenados.                                       |
| Y42                    | Disolventes orgánicos, con exclusión de disolventes halogenados.       |
| Y43                    | Cualquier sustancia del grupo de los dibenzofuranos policlorados.      |
| Y44                    | Cualquier sustancia del grupo de las dibenzoparadioxinas policloradas. |

| TIPO DE RESIDUO | DESCRIPCIÓN   |
|-----------------|---|
| Y45             | Compuestos organohalogenados, que no sean las sustancias mencionadas en el presente anexo (por ejemplo, Y39, Y41, Y42, Y43, Y44). |

*Nota: La tabla muestra la clasificación general de los residuos peligrosos según su actividad generadora. Adaptado de Decreto 4741 de 2005 "Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral"(MINISTERIO DE AMBIENTE, 2005)*

**Apéndice C. Clasificación de los residuos o desechos peligros de acuerdo con la corriente de generación.**

| TIPO DE RESIDUO | DESCRIPCIÓN   |
|-----------------|---|
| <b>A1</b>       | Desechos metálicos o que contengan metales  |
| <b>A1010</b>    | Desechos metálicos y desechos que contengan aleaciones de cualquiera de las sustancias siguientes:<br>Antimonio.<br>Arsénico.<br>Berilio.<br>Cadmio.<br>Mercurio.<br>Talio.<br>Pero excluidos los desechos que figuran específicamente en la lista B.   |
| <b>A 1020</b>   | Desechos que tengan como constituyentes o contaminantes, excluidos los desechos de metal en forma masiva, cualquiera de las sustancias siguientes:<br>Antimonio; compuestos de antimonio.<br>Berilio; compuestos de berilio.<br>Cadmio; compuestos de cadmio.<br>Plomo; compuestos de plomo.<br>Selenio; compuestos de selenio.<br>Telurio; compuestos de telurio |
| <b>A 1030</b>   | Desechos que tengan como constituyentes o contaminantes cualquiera de las sustancias siguientes:<br>Arsénico; compuestos de arsénico.<br>Mercurio; compuestos de mercurio.<br>Talio; compuestos de talio.   |
| <b>A 1040</b>   | Desechos que tengan como constituyentes: Carbonilos de metal Compuestos de cromo hexavalente.   |
| <b>A 1050</b>   | Lodos galvánicos.   |
| <b>A 1060</b>   | Líquidos de desecho del decapaje de metales.  |
| <b>A 1070</b>   | Residuos de lixiviación del tratamiento del zinc, polvos y lodos como jaro sita, hematites, etc.  |

| TIPO DE RESIDUO | DESCRIPCIÓN  |
|-----------------|--|
| <b>A 1080</b>   | Residuos de desechos de zinc no incluidos en la lista B <sup>a</sup> , que contengan plomo y cadmio en concentraciones tales que presenten características del Anexo   |
| <b>A 1090</b>   | Cenizas de la incineración de cables de cobre recubiertos.   |
| <b>A 1100</b>   | Polvos y residuos de los sistemas de depuración de gases de las fundiciones de cobre.  |
| <b>A 1110</b>   | Soluciones electrolíticas usadas de las operaciones de refinación y extracción electrolítica del cobre.  |
| <b>A1120</b>    | Lodos residuales, excluidos los fangos anódicos, de los sistemas de depuración electrolítica de las operaciones de refinación y extracción electrolítica del cobre.  |
| <b>A1130</b>    | Soluciones de ácidos para grabar usadas que contengan cobre disuelto.  |
| <b>A1140</b>    | Desechos de catalizadores de cloruro cúprico y cianuro de cobre.   |
| <b>A1150</b>    | Cenizas de metales preciosos procedentes de la incineración de circuitos impresos no incluidos en la lista B <sup>a</sup> .  |
| <b>A1160</b>    | Acumuladores de plomos de desecho, enteros o triturados.   |
| <b>A1170</b>    | Acumuladores de desecho sin seleccionar excluidas mezclas de acumuladores sólo de la lista B. Los acumuladores de desecho no incluidos en la lista 8 que contengan constituyentes del Anexo I en tal grado que los conviertan en peligrosos.   |
| <b>A1180</b>    | Montajes eléctricos y electrónicos de desecho o restos de estos <sup>6</sup> que contengan componentes como acumuladores y otros baterías incluidos en la lista A, interruptores de mercurio, vidrios de tubos de rayos catódicos y otros vidrios activados y capacitadores de PCB, o contaminados con constituyentes del Anexo I (por ejemplo, cadmio, mercurio, plomo, bifenilo policlorado) en tal grado que posean alguna de las características del Anexo III (véase la entrada correspondiente en la lista B B1110) <sup>a</sup> |
| <b>A2</b>       | Desechos que contengan principalmente constituyentes inorgánicos, que puedan contener metales o materia orgánica   |
| <b>A2010</b>    | Desechos de vidrio de tubos de rayos catódicos y otros vidrios activados.  |
| <b>A2020</b>    | Desechos de compuestos inorgánicos de flúor en forma de líquidos o lodos, pero excluidos los desechos de ese tipo especificados en la lista B <sup>a</sup> .   |
| <b>A2030</b>    | Desechos de catalizadores, pero excluidos los desechos de este tipo especificados en la lista B <sup>a</sup> .   |
| <b>A2040</b>    | Yeso de desecho procedente de procesos de la industria química, sí contiene constituyentes del Anexo I en tal grado que presenten una característica peligrosa del Anexo III (véase la entrada correspondiente en la lista B B2080) <sup>a</sup> .   |
| <b>A2050</b>    | Desechos de amianto (polvo y fibras).  |

| TIPO DE RESIDUO | DESCRIPCIÓN  |
|-----------------|--|
| <b>A2060</b>    | Cenizas volantes de centrales eléctricas de carbón que contengan sustancias del Anexo I en concentraciones tales que presenten características del Anexo III (véase la entrada correspondiente en la lista B B2050) <sup>a</sup> .                 |
| <b>A3</b>       | Desechos que contengan principalmente constituyentes orgánicos, que puedan contener metales y materia inorgánica   |
| <b>A3010</b>    | Desechos resultantes de la producción o el tratamiento de coque de petróleo y asfalto.   |
| <b>A3020</b>    | Aceites minerales de desecho no aptos para el uso al que estaban destinados.   |
| <b>A3030</b>    | Desechos que contengan, estén integrados o estén contaminados por lodos de compuestos antidetonantes con plomo.  |
| <b>A3040</b>    | Desechos de líquidos térmicos (transferencia de calor).  |
| <b>A3050</b>    | Desechos resultantes de la producción, preparación y utilización de resinas, látex, plastificantes o colas/adhesivos excepto los desechos especificados en la lista B (véase el apartado correspondiente en la lista B B4020).                     |
| <b>A3060</b>    | Nitrocelulosa de desecho.  |
| <b>A3070</b>    | Desechos de fenoles, compuestos fenólicos, incluido el clorofenol en forma de líquido o de lodo.   |
| <b>A3080</b>    | Desechos de éteres excepto los especificados en la lista B.  |
| <b>A3090</b>    | Desechos de cuero en forma de polvo, cenizas, lodos y harinas que contengan compuestos de plomo hexavalente o biocidas (véase el apartado correspondiente en la lista B B3100).  |
| <b>A3100</b>    | Raeduras y otros desechos del cuero o de cuero regenerado que no sirvan para la fabricación de artículos de cuero, que contengan compuestos de cromo hexavalente o biocidas (véase el apartado correspondiente en la lista B B3090) <sup>a</sup> . |
| <b>A3110</b>    | Desechos del curtido de pieles que contengan compuestos de cromo hexavalente o biocidas o sustancias infecciosas (véase el apartado correspondiente en la lista B B3110) <sup>a</sup> .  |
| <b>A3120</b>    | Pelusas - fragmentos ligeros resultantes del desmenuzamiento.  |
| <b>A3130</b>    | Desechos de compuestos de fósforo orgánicos.   |
| <b>A3140</b>    | Desechos de disolventes orgánicos no halogenados pero con exclusión de los desechos especificados en la lista B.   |
| <b>A3150</b>    | Desechos de disolventes orgánicos halogenados.   |
| <b>A3160</b>    | Desechos resultantes de residuos no acuosos de destilación halogenados o no halogenados derivados de operaciones de recuperación de disolventes orgánicos.   |
| <b>A3170</b>    | Desechos resultantes de la producción de hidrocarburos halogenados alifáticos (tales como clorometano, dicloroetano, cloruro de vinilo, cloruro de alilo y epicloridrina).   |

| TIPO DE RESIDUO | DESCRIPCIÓN   |
|-----------------|---|
| <b>A3180</b>    | Desechos, sustancias y artículos que contienen, consisten o están contaminados con bifenilo policlorado (PCB), terfenilo policlorado (PCT), naftaleno policlorado (PCN) o bifenilo polibromado (PBB), o cualquier otro compuesto polibromado análogo, con una concentración igual o superior a 50 mg/kg.      |
| <b>A3190</b>    | Desechos de residuos alquitranados (con exclusión de los cementos asfálticos) resultantes de la refinación, destilación o cualquier otro tratamiento pirolítico de materiales orgánicos.  |
| <b>A3200</b>    | Material bituminoso (desechos de asfalto) con contenido de alquitrán resultantes de la construcción y el mantenimiento de carreteras (obsérvese el artículo correspondiente B2130 de la lista B) <sup>a</sup> .   |
| <b>A4</b>       | Desechos que pueden contener constituyentes inorgánicos u orgánicos   |
| <b>A4010</b>    | Desechos resultantes de la producción, preparación y utilización de productos farmacéuticos, pero con exclusión de los desechos especificados en la lista B <sup>a</sup> .  |
| <b>A4020</b>    | Desechos clínicos y afines; es decir, desechos resultantes de prácticas médicas, de enfermería, dentales, veterinarias o actividades similares, y desechos generados en hospitales u otras instalaciones durante actividades de investigación o el tratamiento de pacientes, o de proyectos de investigación. |
| <b>A4030</b>    | Desechos resultantes de la producción, la preparación y la utilización de biocidas y productos fitofarmacéuticos, con inclusión de desechos de plaguicidas y herbicidas que no respondan a las especificaciones, caducados, en desuso o no aptos para el uso previsto originalmente.                          |
| <b>A4040</b>    | Desechos resultantes de la fabricación, preparación y utilización de productos químicos para la preservación de la madera.  |
| <b>A4050</b>    | Desechos que contienen, consisten o están contaminados con algunos de los productos siguientes:<br>Cianuros inorgánicos, con excepción de residuos que contienen metales preciosos, en forma sólida, con trazas de cianuros inorgánicos.<br>Cianuros orgánicos.   |
| <b>A4060</b>    | Desechos de mezclas y emulsiones de aceite y agua o de hidrocarburos y agua.  |
| <b>A4070</b>    | Desechos resultantes de la producción, preparación y utilización de tintas, colorantes, pigmentos, pinturas, lacas o barnices, con exclusión de los desechos especificados en la lista 8 (véase el apartado correspondiente de la lista B B4010). <sup>a</sup>  |
| <b>A4080</b>    | Desechos de carácter explosivo (pero con exclusión de los desechos especificados en la lista B). <sup>a</sup>   |

| TIPO DE RESIDUO | DESCRIPCIÓN  |
|-----------------|--|
| <b>A4090</b>    | Desechos de soluciones ácidas o básicas, distintas de las especificadas en el apartado correspondiente de la lista 8 (véase el apartado correspondiente de la lista B B2120). <sup>a</sup>   |
| <b>A4100</b>    | Desechos resultantes de la utilización de dispositivos de control de la contaminación industrial para la depuración de los gases industriales, pero con exclusión de los desechos especificados en la lista B.                             |
| <b>A4110</b>    | Desechos que contienen, consisten o están contaminados con algunos de los productos siguientes:<br>Cualquier sustancia del grupo de los dibenzofuranos policlorados.<br>Cualquier sustancia del grupo de las dibenzodioxinas policloradas. |
| <b>A4120</b>    | Desechos que contienen, consisten o están contaminados con peróxidos   |
| <b>A4130</b>    | Envases y contenedores de desechos que contienen sustancias incluidas en el Anexo I, en concentraciones suficientes como para mostrar las características peligrosas del Anexo III.  |
| <b>A4140</b>    | Desechos consistentes o que contienen productos químicos que no responden a las especificaciones o caducados correspondientes a las categorías del anexo I, y que muestran las características peligrosas del Anexo III.                   |
| <b>A4150</b>    | Sustancias químicas de desecho, no identificadas o nuevas, resultantes de la investigación y el desarrollo o de las actividades de enseñanza y cuyos efectos en el ser humano o el medio ambiente no se conozcan.                          |
| <b>A4160</b>    | Carbono activado consumido no incluido en la lista B (véase el correspondiente apartado de la lista B B2060) <sup>a</sup>  |

*Nota: La tabla muestra la clasificación general de los residuos sólidos conforme a peligrosidad. Adaptado de Decreto 4741 de 2005 "Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral"(MINISTERIO DE AMBIENTE, 2005)*

#### **Apéndice C. Rangos de CIIU y sectores económicos generadores de residuos o desechos peligrosos**

| Divisiones     | Descripción del sector                             | Rango código de actividad |
|----------------|--|---------------------------|
| <b>01 a 03</b> | Agricultura, ganadería, caza, silvicultura y pesca | 0111 a 0322               |
| <b>05 a 09</b> | Explotación de minas y canteras                    | 0510 a 0990               |
| <b>10 a 33</b> | Industrias manufactureras                          | 1011 a 3320               |

|                |   |             |
|----------------|---|-------------|
| <b>35</b>      | Suministro de electricidad, gas, vapor, y aire acondicionado  | 3511 a 3530 |
| <b>36 a 39</b> | Distribución de agua; evacuación y tratamiento de aguas residuales, gestión de desechos y actividades de saneamiento ambiental  | 3600 a 3900 |
| <b>41 a 43</b> | Construcción  | 4111 a 4390 |
| <b>45 a 47</b> | Comercio al por mayor y al por menor; reparación de vehículos automotores y motocicletas  | 4511 a 4799 |
| <b>49 a 53</b> | Transporte y almacenamiento   | 4911 a 5320 |
| <b>55 a 56</b> | Alojamiento y servicios de comida   | 5511 a 5630 |
| <b>58 a 63</b> | Información y comunicaciones  | 5811 a 6399 |
| <b>64 a 66</b> | Actividades financieras y de seguros  | 6411 a 6630 |
| <b>68</b>      | Actividades inmobiliarias   | 6810 a 6820 |
| <b>69 a 75</b> | Actividades profesionales, científicas y técnicas   | 6910 a 7500 |
| <b>77 a 82</b> | Actividades de servicios administrativos y de apoyo   | 7710 a 8299 |
| <b>84</b>      | Administración pública y defensa; planes de seguridad social de afiliación obligatoria  | 8411 a 8430 |
| <b>85</b>      | Educación   | 8511 a 8560 |
| <b>86 a 88</b> | Actividades de atención de la salud humana y de asistencia social   | 8610 a 8890 |
| <b>90 a 93</b> | Actividades artísticas, de entretenimiento y recreación   | 9001 a 9329 |
| <b>94 a 96</b> | Otras actividades de servicios  | 9411 a 9609 |
| <b>97 a 98</b> | Actividades de los hogares en calidad de empleadores; actividades no diferenciadas de los hogares individuales como productores de bienes y servicios para uso propio | 9700 a 9820 |
| <b>99</b>      | Actividades de organizaciones y entidades extraterritoriales  | 9900        |

*Nota: La tabla muestra la clasificación general de las actividades generadoras de residuos o desechos peligrosos. Adaptado*

*del Informe Nacional de Residuos o Desechos Peligrosos. (IDEAM, 2019)*

**Apéndice D. Procesos de aprovechamiento, valorización y tratamiento de residuos o desechos peligrosos**

| Aprovechamiento,<br>valorización y/o tratamiento | Tipo   | Descripción  |
|--|--|--|
| <b>Físico</b>                                    | Separación manual  | Elimina residuos seleccionados mediante inspección visual.   |
|  | Cribado y tamizado   | Elimina material grueso.   |
|  | Sedimentación  | Asienta los sólidos para separarlos del líquido.   |
|  | Decantación  | Elimina el contenido de agua.  |
|  | Centrifugación   | Elimina el contenido de agua.  |
|  | Autoclave  | Esteriliza los residuos mediante calor y presión.  |
|  | Filtración   | Separa las mezclas de sólidos y líquidos a través de un medio poroso o filtrante, donde se retiene la mayor parte de los componentes sólidos de la mezcla. |
|  | Absorción  | Adhiere contaminantes gaseosos sobre superficies líquidas para que se disuelvan.   |
|  | Lavado del suelo   | Extrae contaminantes solubles.   |
|  | Secado del lodo  | Elimina líquidos retenidos en los lodos.   |
| <b>Químico</b>                                   | Reducción y oxidación química                                    | Utiliza agentes para transformar los componentes.  |
|  | Neutralización   | Neutraliza el pH para soluciones ácidas o básicas.   |
|  | Precipitación  | Separa los componentes peligrosos de la solución.  |
|  | Decloración  | Elimina el cloro de los materiales orgánicos.  |
|  | Hidrólisis.  | Separa los componentes añadiendo agua  |
|  | Electrólisis   | Separa los compuestos químicos mediante descarga eléctrica.  |
| <b>Físico-químico</b>                            | Extracción de solventes separación de la membrana semipermeables | Utiliza un solvente inmiscible para disolver material orgánico en la solución acuosa.  |
|  | Floculación y coagulación  | Adición de productos químicos a sustancias de tipo líquido con el fin de encapsular los materiales caracterizados como RESPEL y formar una fase sólida.    |

| Aprovechamiento,<br>valorización y/o tratamiento | Tipo                                 | Descripción   |
|--|--------------------------------------|---|
|  | Stripping / Desorción                | Separa los componentes volátiles del líquido, sometiéndolos a una corriente de gas.   |
|  | Lixiviación                          | Elimina los componentes solubles del material sólido.   |
|  | Limpieza                             | Elimina los componentes de la corriente de gas o líquida, por contacto con el líquido/mezcla o polvos de limpieza.  |
|  | Irradiación de uva/ozonólisis        | Separa los componentes peligrosos mediante ozono/energía.   |
|  | Intercambio de iones                 | Intercambio con especies iónicas disueltas mediante el contacto con resina.   |
| <b>Biológico</b>                                 | Lodos activados                      | Biodegradación de especies orgánicas con lodo bioactivado en fase acuosa.   |
|  | Biológico giratorio                  | Elimina las especies orgánicas acuosas en contacto con el filtro bacterial rico.  |
|  | Lagunas aireadas y de estabilización | Se elimina los residuos orgánicos en cavidades profundas con oxígeno.   |
|  | Digestión anaerobia                  | Degrada los residuos orgánicos en ausencia de oxígeno.  |
|  | Utilización del suelo                | Biodegrada la materia orgánica mediante la acción de los microorganismos del suelo.   |
|  | Biorremediación                      | Proceso utilizado para detoxificar contaminantes en ambientes como mares, estuarios, lagos ríos y suelos usando de forma estratégica microorganismos o sus enzimas.   |
|  | Landfarming                          | Remediación biológica mediante la cual los materiales contaminados son esparcidos en una superficie de suelo, o son extraídos del lugar y apilados sobre una superficie impermeable, para que presentes generen materiales inocuos para el ambiente, o subproductos estabilizados que no presentan peligro. |

| Aprovechamiento, valorización y/o tratamiento | Tipo  | Descripción   |
|---|---|---|
| <b>Térmico</b>                                | Fitorremediación  | Aprovechamiento de la capacidad de ciertas especies vegetales para extraer del suelo a través de sus raíces, contaminantes inorgánicos tales como metales pesados y acumularlos en su tejido vegetal.   |
|   | Estabilización  | Las transformaciones se dan a través de reacciones químicas que fijan los compuestos tóxicos en polímeros impermeables o en cristales estables, permiten mejorar las características físicas del residuo; disminuir el área superficial a través de la cual se transfieren contaminantes, reducir la solubilidad, toxicidad de los contaminantes. |
|   | Solidificación  | Tratamiento que genera una masa sólida monolítica de residuos tratados. Mejora su integridad estructural, sus características físicas y facilita su manejo, transporte y disposición final. Permite: incrementar la dureza, disminuir la compresibilidad y permeabilidad.   |
|   | Estabilización/Solidificación   | El objetivo es el acondicionamiento de las características físicas y la disminución del área superficial de los RESPEL, con el fin de reducir la transferencia de masa y la solubilidad de los contaminantes presentes. Fijación inorgánica Se utilizan materiales como cemento Pórtland , materiales puzolánicos y cal.                          |
|   | Encapsulamiento   | Son utilizados como asfalto, polietileno, urea formaldehído, poliéster y butadieno, también la técnica de transformación en vidrio por medio de la mezcla y fusión con materiales como sílice.  |
|   | Incineración  | Combustión completa o utilizando el oxígeno excedente con el fin de oxidar completamente el material.   |
| Co-procesamiento en horno cementero           | Utilización de la misma unidad de producción de clinker para la combustión de residuos. |   |

| Aprovechamiento,<br>valorización y/o tratamiento | Tipo                     | Descripción  |
|--|--------------------------|--|
|  | Pirólisis                | Descomposición térmica en ausencia total de oxígeno con el fin de oxidar de forma parcial el material.   |
|  | Gasificación             | Combustión incompleta o en ausencia parcial de oxígeno.  |
|  | Arco de plasma           | Volatilización y posterior combustión del residuo por contacto con un gas energizado. La tecnología es aplicable a residuos orgánicos líquidos finamente divididos y puede ser utilizada para residuos con alto contenido de cloro, pesticidas, PCBs, dioxina y furanos. |
|  | Oxidación en sal fundida | Oxidación sin llama, desarrollada a temperaturas entre 1500°C y 2000°C, donde las sustancias orgánicas son oxidadas por el oxígeno en una cámara de reacción donde se encuentra una sal alcalina fundida.  |

*La tabla muestra los procesos de aprovechamiento, valorización y tratamiento de residuos peligrosos. Adaptado de la guía para gestión de residuos peligrosos del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA, 2011).*