

Modelo de simulación dinámica para evaluar la capacidad de generación de energía eléctrica a partir del componente orgánico de los residuos sólidos urbanos en la ciudad de Santiago de Cali.

Jessica Mora Mora. Código: 201052174

Johan Emilio Vega Ramírez. Código: 201052657



Universidad del Valle  
Escuela de Ingeniería Industrial  
Palmira  
2016

Modelo de simulación dinámica para evaluar la capacidad de generación de energía eléctrica a partir del componente orgánico de los residuos sólidos urbanos en la ciudad de Santiago de Cali.

Jessica Mora Mora. Código: 201052174

Johan Emilio Vega Ramírez. Código: 201052657

Trabajo de Grado para obtener el título de  
Ingeniero Industrial

Director:

M.Sc. Juan Carlos Osorio Gómez



Universidad del Valle  
Escuela de Ingeniería Industrial  
Palmira  
2016

NOTA DE ACEPTACIÓN:

---

---

---

---

---

---

---

---

---

FIRMA DEL PRESIDENTE DEL JURADO

---

FIRMA DEL JURADO

---

FIRMA DEL JURADO

Palmira, Febrero de 2016

## **DEDICATORIA**

### **A nuestros padres y familia:**

Flor Aydee Ramírez por darme la vida, dedicar tiempo, tener paciencia, comprensión, creer en mí y por su apoyo incondicional. Madre gracias por tan valioso regalo, permitirme ser alguien en la vida y por darme las herramientas para construir mi futuro, este logro es nuestro. Edwin Yersid y Carlos Andrés por sus consejos y tiempo brindado, son los mejor hermanos que pudiera haber le pedido a vida. Y a todos mis familiares en general. De ustedes también es este logro.

A mi motor de vida, Dios. A mis protectores incansables, Nelson y Ruby. A mis consejeros más tiernos, Diego y María. A los hombres que más admiro, Gabriel, Guillermo, Alirio, José y Richard, porque todo lo que hacen, enaltece mi corazón. Los amo.

## **AGRADECIMIENTOS**

Primeramente a Dios por darme la vida, la paciencia, comprensión y permitirme alcanzar este logro tan anhelado.

También a mi madre por su esfuerzo, por darme tan buena educación, por su dedicación a lo largo de toda mi vida y el acompañamiento en esta etapa de la cual sé que estará muy orgullosa. A mis hermanos por apoyarme en cada momento y brindarme la comprensión en los momentos indicados. A toda mi familia en general por estar pendiente y ayudarme con cada granito de conocimiento y experiencias.

Quiero dar un agradecimiento al director de este trabajo el Msc. Juan Carlos Osorio Gómez por su paciencia, su colaboración e ideas a lo largo de la elaboración de documento y todos los profesores que me acompañaron en la carrera, brindando una porción significativa para lograr la obtención de conocimientos y la finalización de este logro profesional.

Por último, pero no menos importantes a todas las personas que de una manera directa o indirecta, me brindaron conocimientos y apoyo durante todos estos años, me disculpo por no colocar sus nombres pero fueron muchos, yo sé que ustedes saben quiénes son y en este párrafo le doy mis más sinceros agradecimientos.

JOHAN EMILIO VEGA RAMÍREZ

## **AGRADECIMIENTOS**

Mi más profundo sentimiento de gratitud es para ti Padre amado, por ser mi guía y fortaleza en todo momento, especialmente en éste, nunca desatendiste mis oraciones.

Gracias a los seres más maravillosos que conozco desde siempre, mis padres, ustedes fueron el motivo más grande para alcanzar esta meta, su comprensión y amor incondicional me ayudaron en los momentos más difíciles. A mi familia, mi modelo a seguir, por enseñarme que si estamos juntos nada puede vencernos.

A mi madre adoptiva durante todos estos años de carrera, por brindarme su cariño y atención como a una hija más.

Gracias a mis amigos, lograban sacarme muchas sonrisas en momentos de angustia.

Y por supuesto, a Msc Juan Carlos Osorio Gómez, gracias por aceptar dirigir este trabajo, sin su persistencia y paciencia no habría logrado llegar hasta aquí.

JESSICA MORA MORA

## CONTENIDO

|                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| GLOSARIO .....                                                                                           | 1  |
| INTRODUCCIÓN .....                                                                                       | 5  |
| 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....                                                                      | 7  |
| 2. OBJETIVOS .....                                                                                       | 10 |
| 2.1. Objetivo general.....                                                                               | 10 |
| 2.2. Objetivos específicos .....                                                                         | 10 |
| 3. MARCO REFERENCIAL .....                                                                               | 11 |
| 3.1. Dinámica de sistemas.....                                                                           | 11 |
| 3.2. Gestión de los Residuos Sólidos Urbanos.....                                                        | 12 |
| 3.2.1. Sistemas de disposición final de los residuos .....                                               | 13 |
| 3.3. Residuos Sólidos Urbanos (RSU).....                                                                 | 14 |
| 3.4. Tipos de Tecnologías de Generación de Energía.....                                                  | 17 |
| 3.4.1. Tecnologías de Conversión Térmica.....                                                            | 17 |
| 3.4.2. Tecnologías de conversión biológica y química .....                                               | 19 |
| 3.4.3. Tecnologías Alternativas o Renovables .....                                                       | 19 |
| 3.5. Sector Eléctrico en Colombia.....                                                                   | 21 |
| 4. ESTADO DEL ARTE .....                                                                                 | 25 |
| 5. METODOLOGÍA.....                                                                                      | 29 |
| 5.1. Estructura Del Modelo .....                                                                         | 30 |
| 5.1.1. Descripción del sistema .....                                                                     | 30 |
| 5.1.2. Diagrama de Influencias.....                                                                      | 31 |
| 5.1.3. Definición de Variables.....                                                                      | 35 |
| 5.2. Supuestos.....                                                                                      | 43 |
| 6. RESULTADOS .....                                                                                      | 44 |
| 6.1. Escenario 1: Clima Medio .....                                                                      | 44 |
| 6.2. Escenario 2: Temporada de Lluvias .....                                                             | 47 |
| 6.3. Escenario 3: Temporada de Sequía .....                                                              | 48 |
| BIBLIOGRAFÍA.....                                                                                        | 53 |
| ANEXOS.....                                                                                              | 56 |
| ANEXO 1. Tabla del pronóstico a partir de la regresión lineal de ingreso per<br>cápita en Colombia. .... | 56 |

## LISTA DE TABLAS

|                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Clasificación de los residuos sólidos urbanos (RSU). | 15 |
|---------------------------------------------------------------|----|



## LISTA DE FIGURAS

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Estructura del Mercado de Energía Eléctrica.....                  | 23 |
| Figura 2. Carácter iterativo de las fases de construcción de un modelo..... | 29 |
| Figura 3. Diagrama de influencias .....                                     | 32 |
| Figura 4. Bucle de compensación. ....                                       | 33 |
| Figura 5. Bucle de Refuerzo 1.....                                          | 33 |
| Figura 6. Bucle de Refuerzo 2.....                                          | 34 |
| Figura 7. Bucle de refuerzo 3. ....                                         | 35 |
| Figura 8. Diagrama de Forrester. ....                                       | 36 |

## LISTA DE GRÁFICAS

|                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfica 1. Acumulación CO2 Atmósfera Clima Medio .....                                                    | 44 |
| Gráfica 2. Consumo de Electricidad Otras Fuentes clima medio .....                                        | 45 |
| Gráfica 3. RSU en Relleno Sanitario Clima Medio .....                                                     | 46 |
| Gráfica 4. Vida Útil del Relleno Sanitario Colomba-El Guabal con Clima Medio .....                        | 46 |
| Gráfica 5. Acumulación CO2 en la atmosfera con lluvias .....                                              | 47 |
| Gráfica 6. Consumo de Electricidad con Otras Fuentes Térmicas en Temporada de Lluvias .....               | 48 |
| Gráfica 7. Acumulación de CO2 en la Atmosfera en Temporada de Sequía .....                                | 49 |
| Gráfica 8. Consumo de Electricidad con Otras Fuentes Térmicas en Temporada de Sequía. ....                | 50 |
| Gráfica 9. Comparación del Consumo de Electricidad de Otras Fuentes Térmicas en los Tres Escenarios. .... | 51 |

## GLOSARIO

**Aprovechamiento:** Es el proceso mediante el cual, a través de un manejo integral de los residuos sólidos, los materiales recuperados se reincorporan al ciclo económico y productivo en forma eficiente, por medio de la reutilización, el reciclaje, la incineración con fines de generación de energía, el compostaje o cualquier otra modalidad que conlleve beneficios sanitarios, ambientales y/o económicos [1].

**CND.** Centro Nacional de Despacho. Dependencia de Interconexión Eléctrica S.A., encargada de la planeación, supervisión y control de la operación integrada de los recursos de generación, interconexión y transmisión del Sistema Interconectado Nacional – SIN [2].

**Contaminación.** Es la alteración del medio ambiente por sustancias o formas de energía puestas allí por la actividad humana o de la naturaleza en cantidades, concentraciones o niveles capaces de interferir con el bienestar y la salud de las personas, atentar contra la flora y/o la fauna, degradar la calidad del medio ambiente o afectar los recursos de la Nación o de los particulares [3].

**Cultura de la no basura.** Es el conjunto de costumbres y valores de una comunidad que tiendan a la reducción de las cantidades de residuos generados por sus habitantes en especial los no aprovechables y al aprovechamiento de los residuos potencialmente reutilizables [3].

**Disposición final de residuos.** Es el proceso de aislar y confinar los residuos sólidos en especial los no aprovechables, en forma definitiva, en lugares especialmente seleccionados y diseñados para evitar la contaminación, y los daños o riesgos a la salud humana y al medio ambiente [3].

**Generador o productor.** Persona que produce residuos sólidos y es usuario del servicio.

**Presentación:** Es la actividad del usuario de envasar, empacar e identificar todo tipo de residuos sólidos para su almacenamiento y posterior entrega a la entidad prestadora del servicio de aseo para aprovechamiento, recolección, transporte, tratamiento y disposición final [3].

**Reciclador.** Es la persona natural o jurídica que presta el servicio público de aseo en la actividad de aprovechamiento [4].

**Reciclaje.** Es el proceso mediante el cual se aprovechan y transforman los residuos sólidos recuperados y se devuelve a los materiales su potencialidad de reincorporación como materia prima para la fabricación de nuevos productos. El reciclaje puede constar de varias etapas: procesos de tecnologías limpias, reconversión industrial, separación, recolección selectiva acopio, reutilización, transformación y comercialización [3].

**Recolección.** Es la acción y efecto de recoger y retirar los residuos sólidos de uno o varios generadores efectuada por la persona prestadora del servicio.

Recuperación. Es la acción que permite seleccionar y retirar los residuos sólidos que pueden someterse a un nuevo proceso de aprovechamiento, para convertirlos en materia prima útil en la fabricación de nuevos productos [3].

**Residuo sólido o desecho.** Es cualquier objeto, material, sustancia o elemento sólido resultante del consumo o uso de un bien en actividades domésticas, industriales, comerciales, institucionales, de servicios, que el generador abandona, rechaza o entrega y que es susceptible de aprovechamiento o transformación en un nuevo bien, con valor económico o de disposición final. Los residuos sólidos se dividen en aprovechables y no aprovechables. Igualmente, se consideran como residuos sólidos aquellos provenientes del barrido de áreas públicas [3].

**Residuo sólido aprovechable.** Es cualquier material, objeto, sustancia o elemento sólido que no tiene valor de uso directo o indirecto para quien lo genere, pero que es susceptible de incorporación a un proceso productivo [3].

**Residuo sólido no aprovechable.** Es todo material o sustancia sólida o semisólida de origen orgánico e inorgánico, putrescible o no, proveniente de actividades domésticas, industriales, comerciales, institucionales, de servicios, que no ofrece ninguna posibilidad de aprovechamiento, reutilización o reincorporación en un proceso productivo. Son residuos sólidos que no tienen ningún valor comercial, requieren tratamiento y disposición final y por lo tanto generan costos de disposición [3].

**Reutilización.** Es la prolongación y adecuación de la vida útil de los residuos sólidos recuperados y que mediante procesos, operaciones o técnicas devuelven a los materiales su posibilidad de utilización en su función original o en alguna relacionada, sin que para ello requieran procesos adicionales de transformación [3].

**Separación en la fuente.** Es la clasificación de los residuos sólidos en el sitio donde se generan para su posterior recuperación [3].

**SSPD.** Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. Creada por el artículo 370 de la Constitución Política como un organismo de carácter técnico, adscrito al Departamento Nacional de Planeación – DNP de acuerdo al decreto ley 1363 de 2000, con personería jurídica, autonomía administrativa y patrimonial. Desempeña funciones específicas de control y vigilancia, con independencia de las Comisiones de Regulación y con la inmediata colaboración de los Superintendentes delegados [2].

**Trasbordo o transferencia.** Es la actividad de trasladar los residuos sólidos de un vehículo a otro por medios mecánicos, evitando el contacto manual y el esparcimiento de los residuos [1].

**Tratamiento.** Es el conjunto de operaciones, procesos o técnicas mediante los cuales se modifican las características de los residuos sólidos incrementando sus posibilidades de reutilización o para minimizar los impactos ambientales y los riesgos para la salud humana [5].

**Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME).** Es una unidad administrativa especial, adscrita al Ministerio de Minas y Energía, que tiene entre otras funciones la de elaborar y actualizar el Plan Energético Nacional y el Plan de Expansión del Sector Eléctrico en concordancia con el Plan Nacional de Desarrollo [2].

## INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la población, el desarrollo tecnológico y el consumismo creciente han llevado a un alto consumo de los recursos. Por consiguiente, hay un incremento de la producción de residuos [6]. Los residuos sólidos urbanos (RSU) son aquellos que provienen de las actividades domésticas, comerciales, industriales (pequeña industria y artesanía), institucionales, de mercados, y los resultantes del barrido y limpieza de vías y áreas públicas [7]. Los componentes principales de los RSU son similares a lo largo del mundo, pero el volumen de residuos generados, la densidad y la proporción de los componentes varían mucho de país a país, y de ciudad a ciudad dentro de un país según el nivel de desarrollo económico, ubicación geográfica, clima y condiciones sociales [8]. Desde el punto de vista de la gestión sostenible de los residuos es primordial la reducción de la generación de residuos y el reciclaje, puesto que ambas alternativas son beneficiosas en términos de la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), sin embargo, algunos residuos no son adecuados para su reciclaje [9].

Un estudio realizado en la ciudad de Santiago de Cali en el año 2012 permitió caracterizar los RSU, destacándose un alto porcentaje de materia orgánica, correspondiente al 60% de los residuos totales generados en la zona urbana [10]. Para estos residuos, que no son adecuados para ser reciclados, la recuperación de energía se vuelve esencial, ya que contribuye a reducir el uso de combustibles fósiles y los problemas ambientales y sanitarios de eliminación de residuos, a diferencia de la alternativa de los rellenos sanitarios que constituyen la principal fuente de las emisiones directas de GEI por el metano liberado a la atmosfera [9].

El metano representa un poco más del 50% de los gases que constituyen el biogás, lo que hace a este un combustible con buenas características para ser usado en turbinas o máquinas de combustión interna que accionen generadores eléctricos [11]. El biogás producido en los rellenos sanitarios es el resultado de procesos físicos, químicos y microbianos que ocurren en los residuos, su uso para la generación de energía es una tecnología casi comercial, ya que puede cubrir un cierto porcentaje de la demanda de energía [12] .

El Sector eléctrico colombiano es considerado uno de los más robustos a nivel Latinoamericano, está fraccionado en diferentes actividades (Generación, Transmisión, Distribución y Comercialización) y un marco regulatorio cambiante.

En relación al consumo final de energía eléctrica en Colombia, el más significativo es el realizado por el sector residencial. Le siguen en importancia el sector industrial, comercial y público y el Agropecuario y minero. El sector transporte es el que menos consume energía eléctrica. Por otro lado, la generación de Energía eléctrica depende en gran parte de las hidroeléctricas debido a las circunstancias climáticas. Para el año 2012, esta fuente tuvo una participación del 64% del total de la capacidad instalada de generación. Le siguen, las fuentes térmicas y los generadores de pequeña escala, las fuentes de cogeneración aportan solo el 0.4% de la capacidad instalada. La participación de las hidroeléctricas sigue siendo importante, sin embargo disminuyó en 2012, pasando de 78% en 2011 a 75% en 2012 [13] .

Considerando la generación de energía eléctrica a partir del componente orgánico de los RSU como un sistema dinámico y complejo, se ha propuesto estudiar este sistema empleando la simulación dinámica como herramienta de análisis para predecir el comportamiento de los distintos factores involucrados en el aprovechamiento de los RSU a través del tiempo.

Con la presente investigación se pretende aportar a los estudios de dinámica de sistemas en materia de conversión de residuos en energía, mediante un proceso de descomposición natural del componente orgánico, efectuado por bacterias en ausencia de aire. El propósito de esta investigación es desarrollar un modelo de simulación dinámica, que permita evaluar la capacidad y el impacto ambiental de la generación de energía eléctrica a partir del componente orgánico de los RSU.



## **1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Las proyecciones de Naciones Unidas sobre el crecimiento de la población mundial, afirma que la actual estimada en 7.000 millones, aumentará en mil millones para el 2025 [14]. Por otro lado, la Oficina de Administración Energética de Estados Unidos afirma que el consumo de energía eléctrica mundial aumentó en promedio un 3% anual entre el 2006 y 2010, esto debido a la innovación tecnológica y el crecimiento económico de algunos países como China, India y Brasil [13]. En este mismo sentido, la Agencia Internacional de Energía (AIE) anticipa que la demanda global crecerá en 45% para el año 2030 [15]. Estas situaciones plantean problemas de magnitud. El mundo quintuplicará la generación de residuos per cápita, lo que representaría riesgos para la salud y el medio ambiente [16], y en muchos casos el cierre de los rellenos sanitarios que exceden su capacidad y por consiguiente, una demanda incesante en materia de nuevos sitios para la disposición final de estos residuos [17]. En ese sentido, es importante encontrar un uso adecuado y sostenible de los residuos sólidos urbanos (RSU) que provienen de aquellos materiales de desecho de origen domiciliario y que hacen parte de los residuos sólidos, como una fuente de generación de energía eléctrica.

Las tecnologías de recuperación de la energía de los residuos se pueden separar en dos grupos: la conversión Biológica que es efectuada por bacterias mediante el proceso de digestión anaerobia, donde la fracción orgánica de los residuos se descompone de manera natural en ausencia de aire y la conversión térmica que consiste en la conversión de los RSU en productos gaseosos, líquidos y sólidos mediante reacciones químicas inorgánicas [18].

Desde el siglo XIX hasta la actualidad se ha dado un consumo acelerado de energía, y se han buscado otras fuentes de energía para cubrir la demanda creciente que se viene produciendo en todo este tiempo, especialmente a partir del inicio de la Revolución Industrial [19]. En ese sentido, las energías renovables han tenido históricamente barreras para su desarrollo tanto de índole tecnológica como económica, pero hoy en día en muchos casos esas barreras han sido superadas. Así, la generación y consumo de biogás se está expandiendo rápidamente en muchos países.

El biogás se genera a partir de residuos orgánicos sometidos a un proceso de digestión anaeróbica que ocurre en compartimentos cerrados llamados biodigestores. Este gas tiene un alto contenido de metano, lo que le confiere un valor energético. Además del beneficio energético, el residuo de la digestión es un buen fertilizante agrícola [20].

Por otro lado, los resultados de estudios latinoamericanos sobre composición de los RSU coinciden en destacar un alto porcentaje de materia orgánica putrescible (entre 50 y 80%), contenidos moderados de papel y cartón (entre 8 y 18%), plástico y caucho (entre 3 y 14%) y vidrio y cerámica (entre 3 y 8%) [7].

En Colombia el sector eléctrico, de acuerdo a XM, empresa filial de ISA, el consumo de energía eléctrica de 2011 y 2012 fue de 57.150 y 59.370 GWh respectivamente, el cual tuvo un crecimiento del 3,9%, el más alto de los últimos años. Las proyecciones de la UPME (Unidad de Planeación Minera Energética) para los próximos años, declara que para el año 2022 se tendrá un aumento promedio acumulativo de 45% [13].

Durante el mes de marzo del 2015 el Sistema Interconectado Nacional registró un incremento en la oferta de energía debido a la puesta en marcha de generación a partir de la biomasa. La participación porcentual para este mes de los diferentes tipos de tecnologías fue de 70.49% para las centrales hidroeléctricas, 18.35% para las térmicas (gas y carbón), 0.5% para plantas de biomasa y 10.66 para las demás [21].

En Colombia, los 32 departamentos con sus 1.085 municipios generan aproximadamente 21.000 ton/día de residuos sólidos procedentes de las actividades residenciales, comerciales e institucionales con un porcentaje de material orgánico del 56,4 % [22]. La ciudad Santiago de Cali con una población de 2'294.643 habitantes en el año 2012 generó aproximadamente 615.411 toneladas de residuos sólidos (RS) y consumió 2'662.019 Mwh por año. Con los datos de la población de la zona urbana de Santiago de Cali y los RS se estimó que la producción per cápita (PPC) en la zona urbana, tuvo un valor de 0,74 kg/día-habitante [23].

Con base en lo anterior, resulta importante el desarrollo de una metodología que permita analizar las interacciones y el comportamiento de los factores involucrados en el proceso de generación de energía eléctrica a partir del componente orgánico de los RSU, como un problema complejo y dinámico que no depende solamente de la tecnología disponible, sino también de factores económicos y sociales.

En ese sentido, considerando la producción de residuos sólidos urbanos de la ciudad de Cali, fueron planteadas las siguientes preguntas de investigación:

¿Qué capacidad tiene la ciudad de Santiago de Cali para generar RSU como fuente de generación de energía eléctrica a partir del componente orgánico de éstos?

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo general**

Desarrollar un modelo dinámico que permita evaluar la capacidad de generación de residuos sólidos urbanos en la ciudad de Santiago de Cali como fuente de generación de energía eléctrica.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Analizar los elementos y las relaciones asociadas con la generación de residuos sólidos urbanos y la generación de energía eléctrica a partir del componente orgánico de éstos, mediante un diagrama causal.
- Simular a través de la dinámica de sistemas la generación de residuos sólidos urbanos como fuente de generación de energía eléctrica.
- Estimar la generación de energía eléctrica y el impacto ambiental de las emisiones atmosféricas en la ciudad de Santiago de Cali en el largo plazo, a partir del modelo de simulación desarrollado.

### **3. MARCO REFERENCIAL**

#### **3.1. Dinámica de sistemas**

Forrester, desarrolló esta metodología durante la década de los cincuenta, estableciendo un paralelismo entre los sistemas dinámicos (o en evolución) y uno hidrodinámico, constituido por depósitos, intercomunicados por canales con o sin retardos, variando mediante flujos su nivel, con el concurso de fenómenos exógenos.

La primera aplicación fue el análisis de la estructura de una empresa norteamericana, y el estudio de las oscilaciones muy acusadas en las ventas de esta empresa, publicada como Industrial Dynamics. En 1969 se publica la obra Dinámica Urbana, en la que se muestra cómo el "modelado DS" es aplicable a sistemas de ciudades. En 1970, aparece El modelo del mundo, trabajo que sirvió de base para que Meadows y Meadows realizasen el I Informe al Club de Roma, divulgado posteriormente con el nombre de Los límites del crecimiento. Estos trabajos y su discusión popularizaron la Dinámica de Sistemas a nivel mundial [24].

Se definirá sistema, como un objeto dotado de alguna complejidad, formado por partes coordinadas, de modo que el conjunto posea una cierta unidad cuyos elementos interaccionan juntos, ya que continuamente se afectan unos con otros, de modo que operan hacia una meta común [25].

La metodología sistémica, se ha desarrollado para el estudio de los sistemas en general, abordando problemas en los que la presencia de éstos es dominante. Así, aporta herramientas que van -desde los diagramas de influencias hasta los modelos informáticos- para analizar los sistemas que pueblan el entorno mediante una óptica diferente permitiendo alcanzar una visión más rica de la realidad [25].

La dinámica de sistemas, permite en estos días ir más allá de los estudios de casos y las teorías descriptivas. La dinámica de sistemas no está restringida a

sistemas lineales, pudiendo hacer pleno uso de las características no-lineales de los sistemas. Combinados con las computadoras, los modelos de dinámica de sistemas permiten una simulación eficaz de sistemas complejos. Dicha simulación representa la única forma de determinar el comportamiento en los sistemas no-lineales complejos [24].

Los campos de aplicación de la dinámica de sistemas son muy variados. Desde sus inicios, ha apoyado el desarrollo de importantes aplicaciones en el área de los sistemas ecológicos y medioambientales, en donde se han estudiado, tanto problemas de dinámica de poblaciones, como de difusión de la contaminación [25].

De un modo particular, la generación de energía eléctrica a partir de RSU constituye un sistema complejo que involucra elementos económicos, sociales, ambientales y tecnológicos, que pueden ser modelados por computador a través de la dinámica de sistemas, para analizar su estructura, sus relaciones y su comportamiento ante diferentes escenarios [8].

### **3.2. Gestión de los Residuos Sólidos Urbanos**

Es un sistema de acciones u operaciones donde se emplean medidas ambientales planificadas, que comprende desde la generación de residuos hasta su disposición final adecuada. Además, tiene en cuenta las características socioeconómicas y de volumen, procedencia, costos de emisión y tratamiento, directrices administrativas y posibilidades de recuperación y comercialización de los residuos [26].

Las entradas en un sistema de manejo de residuos sólidos, son los residuos sólidos municipales, la energía y otras materias primas. Las salidas del sistema son productos útiles “revalorizados”, emisiones al aire o agua, y material inerte que se disponen en los rellenos sanitarios [27].

Bajo la perspectiva de la gestión sostenible, el reciclaje y la reducción en la generación de residuos contribuyen de manera importante en la reducción de

gases efecto invernadero. Sin embargo, para aquellos residuos que no son adecuados para su reciclaje, la recuperación de energía se convierte en esencial, ya que puede reducir el uso de combustibles fósiles, los problemas ambientales y sanitarios asociados a la eliminación de residuos, a diferencia de la alternativa de vertedero, que cuando agota su capacidad de almacenamiento, obliga a las regiones a encontrar nuevos sitios, a veces más lejanos y a utilizar métodos eliminación alternativos, ocasionando un aumento en el costo marginal de la gestión [9].

En relación con lo anterior, el servicio de aseo urbano que comprende las actividades de separación, almacenamiento, presentación para su recolección, recolección, barrido, transporte, tratamiento y disposición sanitaria final de los residuos sólidos, tiene como objetivos proteger la salud de la población y mantener un ambiente sano. En ese sentido, es partícipe en el procesamiento para su aprovechamiento o tratamiento a fin de obtener beneficios económicos y ambientales o de hacerlos inocuos. Este aprovechamiento, incluye el uso energético de los RSU mediante su transformación en una forma de energía diferente, por ejemplo: gas combustible o biogás, producido por la digestión anaerobia de los residuos orgánicos y la recuperación de calor proveniente de la incineración de los residuos [7].

### **3.2.1. Sistemas de disposición final de los residuos**

La disposición final es considerada adecuada en rellenos sanitarios, plantas integrales y celdas de contingencia. Para el 2012, el 77,7% de los municipios en Colombia usaron alguno de estos sistemas de disposición final [28]. A continuación se definen algunos de los sistemas más importantes:

**Relleno sanitario:** Es el lugar técnicamente seleccionado, diseñado y operado para la disposición final controlada de los residuos sólidos, sin causar peligro, daño o riesgo a la salud pública, minimizando y controlando los impactos ambientales y utilizando principios de ingeniería, para la confinación y aislamiento de los residuos sólidos en un área mínima, con compactación de residuos, cobertura diaria de los mismos, control de gases y lixiviados, y cobertura final [5].

**Plantas integrales:** En estos lugares se recolectan los residuos sólidos transportados por el servicio público de aseo, ya sean clasificados o mezclados, se realizan actividades de separación y acopio de materiales reciclables que después son vendidos o donados para la reincorporación a la cadena productiva. Los residuos que no pueden ser reciclados se disponen en una celda o relleno, por lo general se ubican en el mismo predio [28].

**Celdas de contingencia:** Son sistemas de almacenamiento temporales, o sea a corto plazo, mientras se realizan los procesos necesarios para establecer el sitio adecuado a largo plazo [28].

**Celda transitoria:** Son sitios por fuera de la normativa considerada como un lugar para la disposición final adecuada [28] .

**Botadero a cielo abierto:** Disposición final a la que son arrojados los residuos sólidos generados por la población, sus principal característica es que carecen de cualquier soporte técnico y normativas para su operatividad o cualquier tipo de tratamiento de sus residuos, simplemente son transportados y dejados allí, causando efectos negativos en el medio ambiente, la salud y las corrientes hídricas internas o externas [29].

**Sistemas de disposición final regional:** son aquellos que cuentan con infraestructura para atender a dos o más municipios [28] .

### **3.3. Residuos Sólidos Urbanos (RSU)**

La composición principal de los RSU es similar a través del mundo pero el volumen de la generación, la densidad y la proporción que lo constituye varía dependiendo del país y de la ciudad, de acuerdo con el nivel de desarrollo económico [8].



Los residuos sólidos urbanos pueden ser clasificados de diversa formas y criterios, en dependencia de la importancia que revisten la utilidad, la peligrosidad fuente de producción, posibilidades de tratamiento, tipo de materiales, entre otros [26].

**Tabla 1.** Clasificación de los residuos sólidos urbanos (RSU).

|                                            |                |
|--------------------------------------------|----------------|
| Por su composición química                 | Orgánicos      |
|                                            | Inorgánicos    |
| Por su utilidad o punto de vista económico | Reciclables    |
|                                            | No reciclables |
| Por su origen                              | Domiciliarios  |
|                                            | Comerciales    |
|                                            | Constructivos  |
|                                            | Industriales   |
|                                            | Agrícolas      |
| Por el riesgo                              | Peligrosos     |
|                                            | No inertes     |
|                                            | Inertes        |

Fuente: [26].

Por su composición, los residuos pueden ser clasificados como orgánicos; aquellos que se descomponen naturalmente o inorgánicos, que por sus características químicas no son biodegradables. Generalmente, la fracción orgánica de los residuos sólidos domiciliarios, está formada por materiales como residuos de comida, papeles, cartón, plásticos, textiles, goma, cuero, madera y residuos de jardín. La fracción inorgánica está formada por artículos como vidrio, cerámica, latas, aluminio y metales ferreos [30].

Algunos residuos pueden reutilizarse en otras actividades o reincorporarse a los ciclos naturales de ahí que por su utilidad los residuos urbanos puedan clasificarse en:

**Reciclables:** Que pueden ser utilizados nuevamente como materia prima en los procesos productivos.

**No Reciclables:** Que por sus propiedades o por la no-disponibilidad de tecnologías de reciclaje, no se pueden reutilizar [26].

Por la fuente de generación los residuos sólidos pueden ser de tipo:

**Domiciliario:** Aquellos originados por la actividad doméstica, como residuos de cocina, restos de alimentos, embalajes y otros. Se incluyen dentro de este grupo los procedentes de residencias colectivas como albergues, hoteles, etc. Y otros, denominados residuos especiales por ser artículos voluminosos, electrodomésticos de consumo, productos de línea blanca, baterías, aceite y neumáticos. Estos residuos normalmente son retirados desde las aceras, en forma separada de los otros residuos domésticos y comerciales.

**Comercial:** Están constituidos por la actividad comercial y de servicios dentro del área urbana, distribución de los bienes de consumo, es decir, almacenes, bancos, supermercados, restaurantes, tiendas, material de oficina. Este grupo no incluye los residuos de los hospitales.

**Industrial:** Pueden ser metalúrgicos, químicos, entre otros; y se pueden presentar en diversas formas como cenizas, lodos, plásticos y restos de minerales originales.

**Agrícola:** Mayormente son de origen animal o vegetal y son el resultado de la actividad agrícola. En este grupo se incluyen los restos de fertilizantes inorgánicos que se utilizan para los cultivos.

**Construcción y Demolición:** Los residuos de la construcción, remodelación y arreglos de viviendas individuales, edificios comerciales y otras estructuras, son clasificados como residuos de construcción. La composición es variable, pero puede incluir: piedras, hormigón, ladrillos, maderas, grava y piezas de fontanería, calefacción y electricidad. Los residuos de los edificios demolidos, calles levantadas, aceras, puentes y otras estructuras, son clasificados como residuos de demolición.

Asimismo, en los residuos sólidos domiciliarios se encuentra una cantidad variada de residuos peligrosos que representan una amenaza substancial, a la salud pública o a los organismos vivos. Muchos de los productos utilizados en

las casas, tales como productos de limpieza, aseo personal, productos del automóvil, de pintura y jardín, son tóxicos y pueden ser peligrosos para la salud y ambiente. Dentro de este grupo, existen algunos que son muy difíciles de degradar, por lo que se les considera como inertes o persistentes [30].

### **3.4. Tipos de Tecnologías de Generación de Energía**

En el mercado del sector eléctrico, no se cuenta con inventarios del producto y la oferta es fija, por lo tanto esto implica que la energía eléctrica debe ser consumida en el mismo momento que es producida. Esto crea problemas de restricciones y la necesidad de un exceso de capacidad instalada (oferta) para atender los picos de demanda. Se considera que la demanda es cíclica siguiendo los patrones de comportamiento de la cotidianidad residencial e industrial, de tal forma que en la curva de la demanda aparecen picos de demanda diarios, semanales e incluso mensuales. Por lo tanto, para garantizar un margen de capacidad que asegure la fiabilidad del sistema, existe el cargo por confiabilidad, el cual introduce competencia por servir energía firme al menor costo posible e incentiva a los generadores la introducción de nueva capacidad, nuevos proyectos de generación de energía eléctrica [31].

En la actualidad, existen diversas tecnologías de recuperación de energía a partir de residuos, las cuales se pueden agrupar en dos grupos:

#### **3.4.1. Tecnologías de Conversión Térmica**

El proceso térmico consiste en la conversión de los RSU en productos gaseosos, líquidos y sólidos mediante reacciones químicas inorgánicas. Este puede darse de tres diferentes formas: incineración, gasificación y pirolisis.

**Incineración Convencional:** Es el tratamiento térmico de los RSU mediante la utilización de altas temperaturas por oxidación completa, generalmente con exceso de oxígeno, reduciendo el volumen de los residuos. Los productos finales son gases de combustión, efluentes líquidos y cenizas. Las plantas que recuperan energía, conocidas como “waste to energy” o “energía de los

residuos”, utilizan el calor producido en las calderas para generar vapor y así mover una turbina generadora de electricidad.

Si bien en los últimos años la industria ha logrado “modernizar” estas plantas y disminuir sus impactos ambientales, no los han eliminado y siguen siendo importantes fuentes de contaminación.

**Gasificación:** La gasificación es un proceso termoquímico en el que un sustrato carbonoso (carbón, biomasa, plástico) es transformado en un gas combustible mediante una serie de reacciones que ocurren en presencia de un agente gasificante (aire, oxígeno, vapor de agua o hidrógeno). La gasificación de hidrocarburos es bastante frecuente y se aplica desde hace tiempo. Se gasifican todo tipo de carbones para poder obtener a partir del gas de síntesis diferentes subproductos, como el sulfato amónico, alquitrán de hulla, coque metalúrgico, hidrógeno, etc.

En la incineración y en la gasificación la reacción química que se produce es exotérmica, es decir que se libera energía directamente. Sin embargo en la gasificación se obtiene un producto gaseoso con un poder calorífico remanente que luego podrá ser aprovechado en una combustión posterior.

**Pirólisis:** Para este caso, la reacción es endotérmica, pero se obtiene un gas derivado cuyo poder calorífico también puede aprovecharse en una combustión posterior [18]. Además, trabaja sin aire y a temperaturas que oscilan entre 250 y 700° C, aunque es difícil de alcanzar en el caso de los RSU, ya que el oxígeno está presente en los residuos.

Las alternativas mencionadas se utilizan principalmente en plantas de gran escala (capacidad mayor a 500 ton/día). Existen otras alternativas como el sistema cBOS, COR, Energos, Aireal, que no son tan populares como las anteriormente mencionadas, pero están empezando a ser utilizadas como nuevas alternativas para la conversión de residuos en energía y que además son aplicables a plantas de pequeña escala [18].

### **3.4.2. Tecnologías de conversión biológica y química**

Estos procesos transforman el componente orgánico de los RSU, a través de bacterias que mediante digestión anaerobia lo descomponen de manera natural en ausencia de aire. Este proceso ocurre en sitios que pueden ser controlados o no, donde el producto resultante es conocido como biogás, cuyos componentes principales son el metano ( $\text{CH}_4$ ) y el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) [32].

El proceso de digestión de sólidos para generar metano a partir del componente orgánico de los RSU, comprende inicialmente la preparación, recepción, selección, separación y reducción de tamaño, del componente orgánico de los RSU. Luego, considera la adición de humedad y nutrientes en forma de fangos de aguas residuales o estiércol de vaca, para el ajuste de pH hasta aproximadamente 6,8 y el calentamiento de la masa húmeda entre 55 y 60 ° C.

Todo lo anterior se lleva a cabo dentro de un biorreactor de flujo continuo, donde los residuos se mezclan homogéneamente. Por último, se realiza la captura, almacenamiento y separación de componentes gaseosos y la evacuación de los fangos digeridos, que pueden ser utilizados como biofertilizantes por su contenido de nutrientes minerales y estabilidad microbiana [30].

### **3.4.3. Tecnologías Alternativas o Renovables**

Las energías alternativas o renovables, son aquellas aprovechables directamente de recursos considerados inagotables como el sol, el viento, los cuerpos de agua, la vegetación o el calor interior de la tierra. La AIE dice que la base de la vida moderna del mundo depende en un 80% del petróleo y a medida que los países se industrializan y sus poblaciones aumentan, también lo hace el consumo de energía.

Según La Unidad de Planeación Nacional Minero Energética (UPME), las energías renovables cubren actualmente cerca del 20% del consumo mundial de electricidad [33].

Cada una de las energías implica diferentes tipos de tecnologías con las cuales se obtiene energía en forma de electricidad, fuerza motriz, calor o combustibles. Éstas se han clasificado en seis grupos: Energía Hidráulica, Energía Solar, Energía Eólica (del viento), Energía de la Biomasa, Energía de los Océanos y Energía de la Geotermia.

**Energía solar:** Es la fuente primaria de luz, para generarla, se usa como fuente la radiación solar que llega a la Tierra. Este tipo de energía es gratuita, no genera emisiones y es silenciosa.

**Energía Eólica:** El viento es aire que está en movimiento, éste se origina por diferencia de temperatura causada por la radiación solar sobre la tierra. La energía eólica puede transformarse en electricidad mediante aerogeneradores, o en fuerza motriz empleando molinos de viento. Es una energía segura y gratuita, pero tiene las desventajas de que la velocidad del viento puede variar, además los aerogeneradores producen ruido y la vida silvestre puede verse afectada, ya que existe el riesgo que las aves caigan en ellos y mueran.

**Energía de Biomasa:** La biomasa es cualquier material de tipo orgánico proveniente de seres vivos que puede utilizarse para producir energía. Se produce al quemar biomasa, como madera o plantas.

Este tipo de energía emite poco dióxido de carbono, por eso puede ser considerada una solución a los métodos de disposición final de residuos. El inconveniente, es que requiere alta inversión de capital y su rentabilidad sólo se vería a largo plazo.

**Energía Hidráulica:** Usa como fuente la fuerza del agua de ríos y lagos. Se transforma mediante las plantas de generación hidráulica y genera electricidad. Éste método es altamente eficiente y no contamina. Sin embargo, sólo es recomendable para los países que tienen climas y topografías adecuadas, como Colombia, donde hay un gran desarrollo de estas infraestructuras.

Para generar este tipo de energía se deben construir represas, que pueden incluir la desviación del curso de ríos, inundación de tierras arables y el desplazamiento de personas. Por otro lado, los hábitats silvestres son afectados y los peces pueden morir atrapados en las turbinas.

**Energía de los Océanos:** Los océanos cubren más del 70% de la energía terrestre. En ellos se pueden encontrar dos tipos de energía: la térmica que proviene del calentamiento solar y la mecánica a partir de las mareas y las olas.

El sol calienta la superficie de los océanos en una proporción muy alta, en comparación con las zonas profundas, de esta manera se crea una diferencia de temperaturas que también puede ser aprovechada, pero es insegura por los fenómenos a que están sujetos los océanos.

**Energía Geotérmica:** Este tipo de energía renovable, proviene del calor procedente del centro de la tierra. Se transforma mediante perforaciones muy profundas para usar la fuerza calorífica bajo la superficie de la tierra para producir electricidad. Es una energía libre de contaminación, pero cuesta dos o tres veces más de lo normal y es limitada en zonas con actividad tectónica [33].

### **3.5. Sector Eléctrico en Colombia**

El mercado de energía se inició el 20 de julio de 1995 con la puesta en funcionamiento de la Bolsa de Energía. La demanda del sistema ha evolucionado en consonancia con el crecimiento económico del país [34].

En el momento en que fue creado el mercado de energía eléctrica, se establecieron los principales agentes a participar dentro de dicho mercado. Así pues, los agentes del sector son: generadores, transmisores, distribuidores y comercializadores [2].

Dado que la electricidad es un insumo que no puede almacenarse, pues no sería económicamente viable, es por esto que la venta y la compra deben ser iguales

en el tiempo. Por lo tanto, en Colombia, debido a que el consumo de energía (demanda) es inferior a la capacidad instalada (oferta), el CND debe coordinar cómo se distribuirá el cubrimiento de la demanda entre los Generadores. Todos los días, el CND hace una proyección de la demanda de energía esperada para el día siguiente. A su vez, los Generadores, de acuerdo con el estado técnico de sus plantas, la disponibilidad de recursos y los costos asociados, envían una oferta en sobre cerrado a la Bolsa de Energía, especificando cantidad de energía (MW) y precio (\$/MWh) hora a hora para el día siguiente. Cuando se reciben las ofertas de todos los Generadores, el CND asigna la generación de energía comenzando con la planta que ofertó al menor precio, y así hasta cubrir la demanda esperada. El precio de bolsa lo fija la última planta despachada, ya sea por mérito o por restricciones.

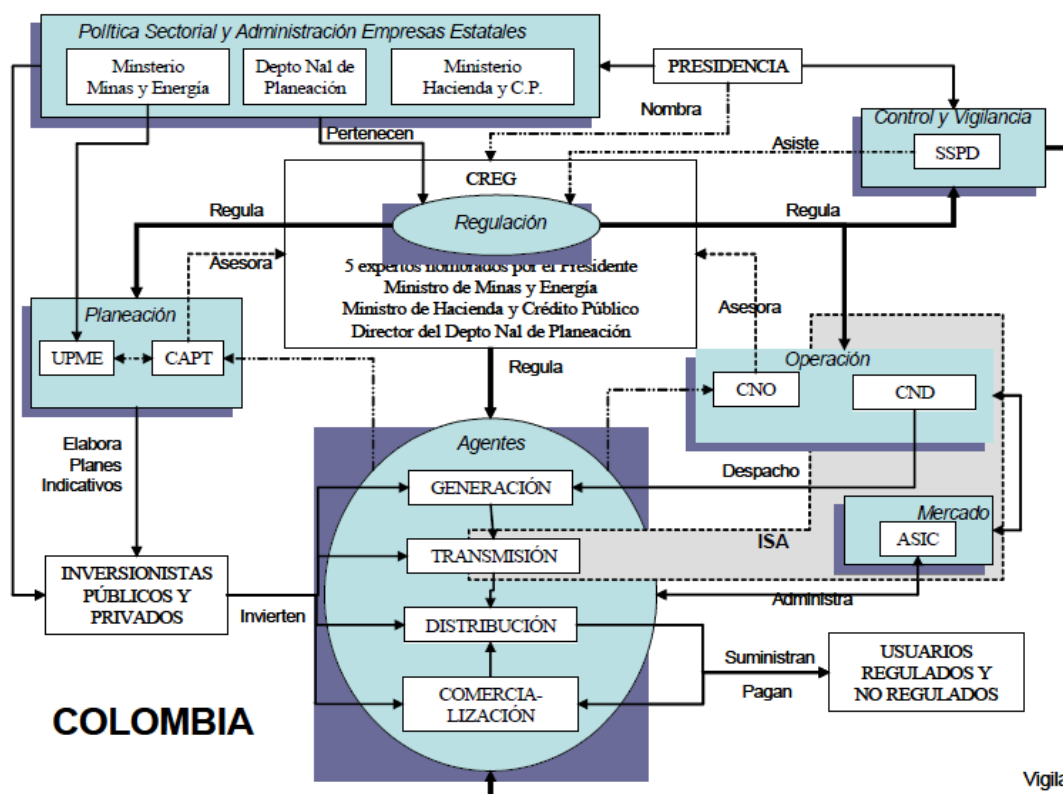
Todos los usuarios del SIN deben comprar la energía a una empresa de Comercialización y la tarifa final debe incluir los cargos por generación, transmisión, distribución, comercialización y otros asociados a los costos de operación y administración del mercado, subsidios y contribuciones [35].

El sector de energía eléctrica se divide en dos mercados. Uno, regulado por el Ministerio de Minas y Energía del cual hacen parte pequeños agentes como lo son las residencias. Otro, que se encuentra el mercado no regulado que comprende los grandes usuarios de energía y grandes generadores de la misma. Las empresas pertenecientes al mercado no regulado son todas aquellas que tienen una demanda mensual de potencia mayor a 0.1 MW por seis meses.

Además, existen varios entes gubernamentales encargados de la regulación, control y administración del mercado de energía eléctrica. En el esquema a continuación se observa la división de poderes establecida [2].



**Figura 1. Estructura del Mercado de Energía Eléctrica.**



**Fuente:** Unidad de Planeación Minero Energética [2].

Tal vez el tipo de agente que mantiene activo el sistema y que con su aporte garantiza la satisfacción de la demanda es el generador. La generación hidráulica domina el mercado (aproximadamente el 70% de la generación total). Por su lado, la generación térmica cobra importancia en épocas de verano en las que la generación hidráulica disminuye. Durante el periodo 2009 y 2010, que experimentó fuerte Fenómeno de El Niño, se evidenció la caída de la generación de energía hidráulica, la cual se vio compensada por generación de energía térmica [2].

Para el año 2012, la demanda de energía eléctrica en Colombia alcanzó los 59.370.0 GWh, registrándose un crecimiento del 3,8% con relación al año 2011, convirtiéndose así, en el mayor crecimiento de demanda en los últimos cinco años. Por el tipo de día, la demanda de los domingos y festivos fue la que presentó un mayor crecimiento (4,3%), seguido por los días sábados (3,9%) y los días ordinarios (3,6%). El crecimiento de 3,8% en la demanda 2011-2012 fue, entre otras razones, producto del incremento en un 6,8% de la demanda no

regulada (industria y comercio) y de un 2,3% de la demanda regulada (consumo residencial y pequeños negocios)[36] .

Ahora bien, teniendo en cuenta que el agotamiento de las fuentes tradicionales de energía (combustibles fósiles) ha puesto a la mayoría de países del mundo a encontrar soluciones en energías alternativas. Colombia con un gran potencial en la generación de este tipo de energías por su posición geográfica, ya está trabajando en ello.

En Colombia, la producción de energía primaria proviene de la hidroelectricidad, por la abundancia de agua en la mayoría de zonas del país, y en un segundo lugar de los combustibles fósiles (petróleo, gas y carbón), cuyas reservas ya se están agotando.

Por lo anterior, el Gobierno Nacional en los últimos años ha invertido en el desarrollo y aplicación de tecnologías alternativas de producción de energía, que funcionen con recursos renovables, para solucionar el problema de la crisis energética mundial y contribuir a un medio ambiente más limpio [33].

#### 4. ESTADO DEL ARTE

Teniendo en cuenta todos los nuevos desarrollos y políticas, el mundo está fracasando en conducir el sistema energético mundial por una senda más sostenible. En el escenario de nuevas políticas, la demanda mundial de energía crece más de un tercio en el periodo que va hasta 2035 [37]. Además, frente a la crítica situación que viven las ciudades por la creciente cantidad de residuos sólidos urbanos (RSU) que generan, y por consiguiente, la demanda incesante en materia de nuevos sitios para su disposición final (basurales o rellenos sanitarios), comienzan a evaluarse diferentes tecnologías para el tratamiento de dichos residuos [17].

La generación de residuos es una consecuencia directa de cualquier tipo de actividad desarrollada por el hombre [38]. Hasta hace un par de décadas los desperdicios producidos en los centros urbanos eran principalmente orgánicos, que se devolvían a la tierra como fertilizantes o eran utilizados como alimento para los animales domésticos. Había pocos problemas de contaminación de aguas, tierra o del aire. Sin embargo, las transformaciones surgidas en las ciudades modificaron simultáneamente la composición y disposición de los residuos, conduciendo a la contaminación del medio ambiente y la proliferación de epidemias [39]. En los hogares, oficinas, mercados, industrias, hospitales, etc. se producen residuos que es preciso recoger, tratar y eliminar adecuadamente [38]. La primera acción que se tomó para controlar los efectos adversos de la basura consistió en alejarlos de las zonas habitacionales y enterrarlos. No sin considerables mejoras técnicas, esta forma de disponer de los residuos sigue siendo hasta nuestra época la más utilizada [39].

Ryu, en un estudio realizado en Corea del Sur, sobre el potencial de la producción de energía renovable y su contribución a la reducción de gases efecto invernadero (GEI), mostró que la principal fuente directa de estas emisiones, es el metano que sale de los rellenos sanitarios y que la reducción de las fuentes y el reciclaje son las mejores formas para reducirlas. Además, señaló que la combustión de los residuos sólidos mezclados, emite menos GEI que los rellenos sanitarios e indirectamente las reduce por el desplazamiento del uso de combustibles fósiles [9] .

En ese sentido, Tchobanoglous define la Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos (GIRSU), como una selección y aplicación de técnicas, tecnologías y programas de gestión idóneas para lograr metas y objetivos específicos de manejo de residuos, donde se gestiona su reducción, reutilización, reciclado, transformación y vertido. También contempla la administración de los elementos funcionales como su generación, manipulación, recolección, separación, procesamiento y transformación, transferencia, transporte, vertido y recuperación de suelo postclausura del vertedero [40].

Por otro lado, Marmolejo en un estudio sobre la composición y las características físicas y químicas de los residuos sólidos que se producen en la actividad domiciliaria en el municipio de Santiago de Cali, obtuvo como resultado que la composición física de los residuos generados en la zona urbana y en la zona rural del municipio corresponde en mayor porcentaje (59% y 50,4%, respectivamente) a residuos de comida, esta producción está directamente relacionada con los usos y hábitos en los hogares. Los resultados obtenidos a partir de los análisis de laboratorio, en general indican que para aumentar el potencial de aplicación de alternativas de aprovechamiento, tratamiento o disposición final controlada, es conveniente estimular la separación en la fuente, con el fin de favorecer los procesos de degradación, estabilización de la materia, disminución del consumo de energía, y control de las emisiones que puedan presentarse por la aplicación de dichas tecnologías [10].

Scano, Asquer, Pistis, Ortu, Demontis, y Cocco, presentaron los resultados experimentales de una planta piloto y la evaluación preliminar del rendimiento de una planta de energía a gran escala. En la cual, durante el periodo experimental de la planta piloto de digestión anaeróbica se trató 3550 kg de residuos de frutas y verduras procedentes del mercado Sardini (Italia), con una totalidad de producción de biogás de 246kg (216 m<sup>3</sup>). El 76% del promedio de los sólidos totales fueron convertidos en biogás. La estimación de producción neta de energía eléctrica de la planta a gran escala fue aproximadamente de 911 kwh/d, con una correspondiente producción anual de 306 MW h/año, lo cual es suficiente para cubrir el 25% del consumo de electricidad del mercado mayorista. El análisis económico mostró que el costo de producción de energía de la planta de energía de digestión anaeróbica a gran escala (alrededor de 150 €/ MW h) es más bajo que el costo de la energía del mercado mayorista (200 €/ MW h) [41].

Respecto a la modelación de sistemas dinámicos, Sufian y Bala, desarrollaron un modelo del sistema de recuperación de energía a partir de Residuos Sólidos Urbanos en la ciudad de Dhaka para predecir la capacidad de generación de residuos sólidos, la recuperación de energía y la fracción de electricidad que podría ser suministrada por los residuos sólidos producidos en una ciudad de Bangladesh. La modelación del sistema se hizo mediante el software conocido como STELLA, que se validó comparando los resultados del modelo con datos históricos, revisando la calidad de los valores de los parámetros y que el modelo se comportara acorde a la realidad. Los resultados mostraron que la población y la capacidad de generación de residuos sólidos de Dhaka incrementan con el tiempo. Y que esto, es debido al crecimiento de la población y el incremento per cápita de la producción de residuos, tanto como del incremento del ingreso promedio per cápita. Además, el 146% de la demanda de energía eléctrica podría haber sido satisfecha por los residuos sólidos y disminuir a 79% en 2025.

Pretel, estimó el ciclo de vida útil de un relleno sanitario aplicando un modelo de dinámica de sistemas considerando un periodo de simulación desde el año 2012 hasta que los resultados proyecten el año de cierre del vertedero actual por falta de capacidad en almacenamiento. Con el propósito de suministrar mejores elementos para la toma de decisiones estratégicas enfocadas a la capacidad de un relleno sanitario como depósito final, favoreciendo a la gestión de los residuos sólidos residenciales (GRSR) en la planificación de la apertura de un nuevo relleno. El resultado de la estimación del periodo de vida útil calculado por el modelo es de 26 años, es decir, que si para el año 2.038 no está diseñado un nuevo relleno sanitario y el depósito actual no puede ampliarse, la estación de transferencia colapsará [42].

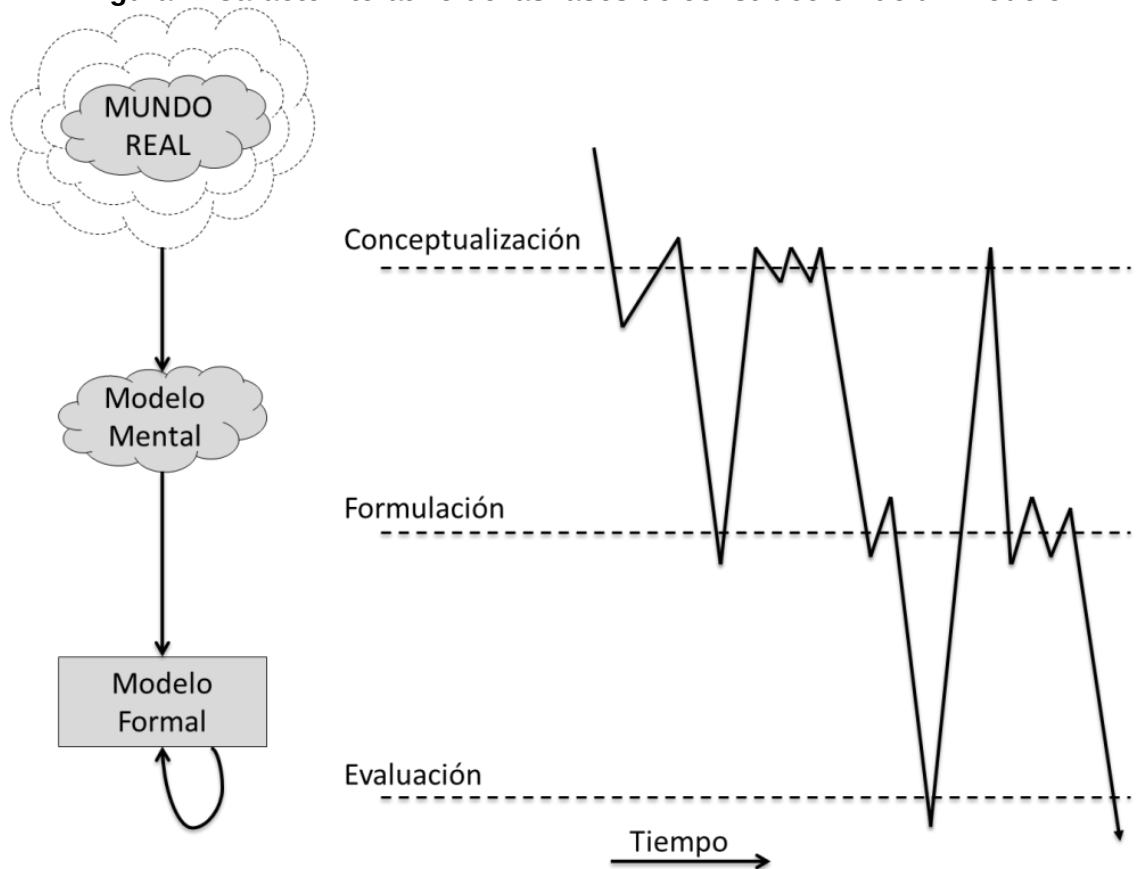
En contraste, Haimovici, Maimbil y S. Romera, modelaron el comportamiento de la Matriz Energética de Argentina y los respectivos subsistemas que lo componen, la cual se encuentra conformada principalmente por tres fuentes de generaciones diferentes como Centrales Hidroeléctricas, Centrales Nucleares y Centrales Térmicas. El objetivo del modelo es ofrecer información importante con pocos parámetros, adicional a esto permitió estimar los parámetros y variaciones de las variables más sensibles al comportamiento. Por su complejidad y extensión el modelo fue dividido en 7 módulos (Evaluación, Decisión, Construcción, Centrales Nuevas, Matriz, Mercado y Demanda). El modelo obtuvo como resultado, una política combinada de las tres fuentes de generación, las centrales térmicas con un impacto en el corto plazo, las centrales

nucleares en el mediano plazo y las centras hidroeléctricas en el largo plazo. Teniendo en cuenta esta política los autores concluyeron que se debe elaborar un plan de inversión anual que asegure el desarrollo sostenible mediante la construcción de centrales de generación para minimizar el impacto asociado al tiempo desde que se decide construir hasta se incorpora a la matriz [43].

## 5. METODOLOGÍA

La metodología desarrollada para abordar la investigación, consistió en la realización de las tres fases contempladas por Aracil y Gordillo en la construcción de un modelo de dinámica de sistemas, que ocurren de forma iterativa, es decir que se puede ir de una fase a otra, cuantas veces sea necesario y sin ningún orden específico, hasta conseguir el ajuste deseado. A continuación se describen las fases en mención.

**Figura 2. Carácter iterativo de las fases de construcción de un modelo**



**Fuente:** [44].

**Conceptualización:** esta fase inicia con una familiarización del problema u oportunidad a ser estudiada, que incluye la revisión de la literatura, opiniones de expertos, experiencias propias, etc. En esta fase se intenta llegar al máximo de concisión, claridad y precisión, mediante un diagrama de influencia o causal del sistema.

**Formulación:** a partir del diagrama influencia se formula en un lenguaje preciso, estableciendo el diagrama de Forrester, en el cual se formulan las ecuaciones del modelo y se asignan valores a los parámetros. Esta fase concluye con un modelo programado de computadora.

**Evaluación:** se procede a ensayar por medio de simulación las hipótesis iniciales, bajo los cuales se construyó el modelo. Posteriormente, se realiza un análisis de sensibilidad para observar la consistencia del modelo. Una vez considerado los resultados de la hipótesis y del análisis de sensibilidad satisfactorio, se procede a estudiar el comportamiento bajo distintas políticas, para elaborar las respectivas recomendaciones respecto al futuro de la realidad del sistema [44].

## **5.1. Estructura Del Modelo**

### **5.1.1. Descripción del sistema**

El sistema comprende desde el consumo de recursos, que está ligado al crecimiento económico (PIB) y el consumismo de la población en la zona urbana, constituyendo así una creciente generación de residuos. Esta generación se clasifica en los residuos que son adecuados para su reciclaje, Biorresiduos, los cuales se disponen para generar biogás y los Residuos no Aprovechados, que van al relleno sanitario debido a que no es posible tratarlos o aprovecharlos.

La problemática planteada, conlleva principalmente a emisiones de gases efecto invernadero más elevadas y a una reducción en la vida útil de los rellenos sanitarios, que de exceder su capacidad demandarían la construcción de nuevos sitios.

Para la evaluación de la capacidad de generación de electricidad a partir del componente orgánico de los RSU y el impacto ambiental asociado, se realizará el análisis comparativo de las siguientes variables:

- Acumulación de CO<sub>2</sub> en la atmósfera.



- Fracción de la demanda eléctrica de otras fuentes térmicas desplazada por la generación de electricidad a partir de biogás.
- Efecto en la vida útil del relleno sanitario.

### 5.1.2. Diagrama de Influencias

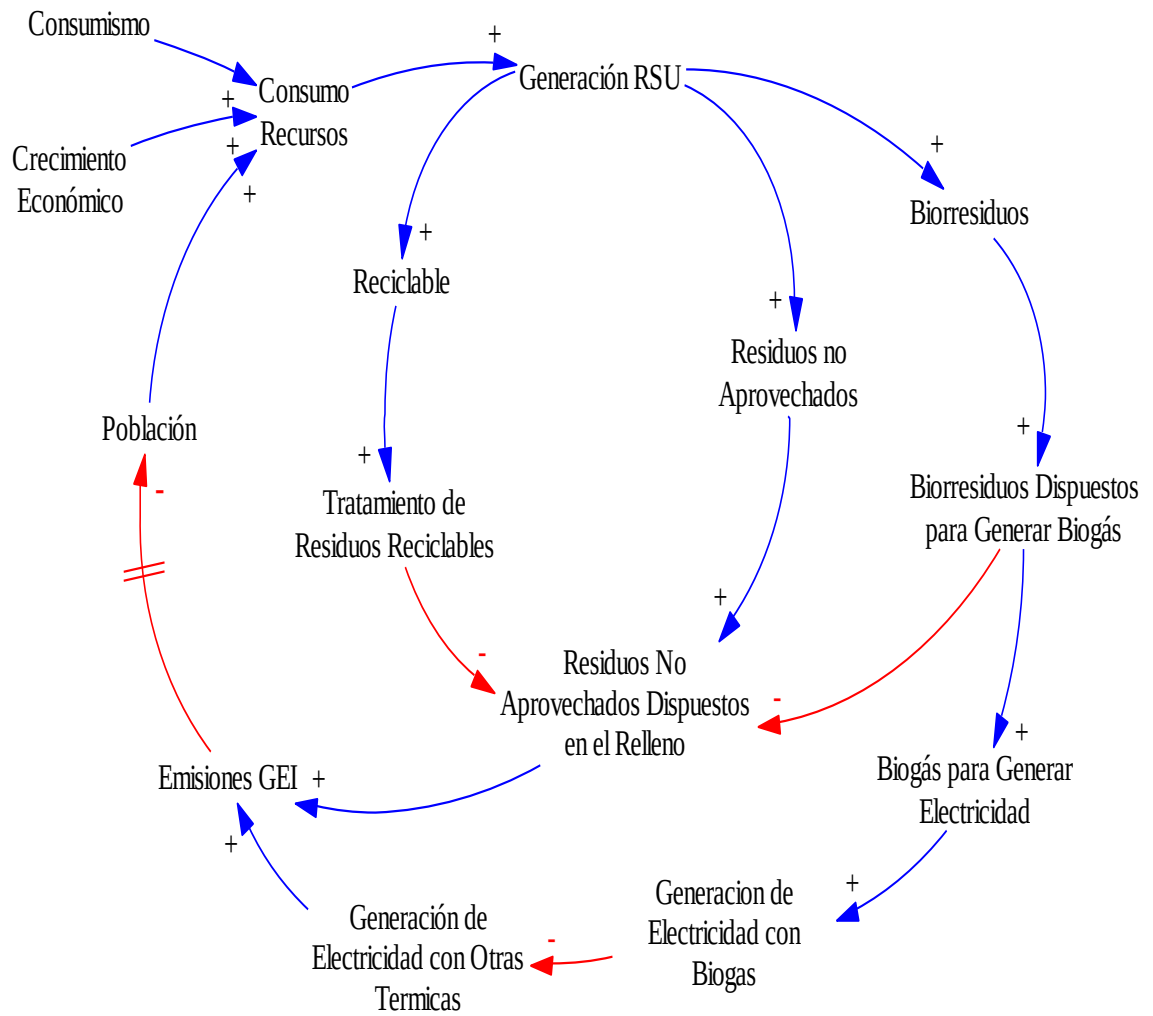
El sistema está representado mediante el diagrama observado en la figura 3, donde se ilustran los principales factores asociados y las relaciones causales existentes en la problemática que se estudia. En el diagrama de la figura 3, se pueden observar cuatro bucles, uno de compensación y tres de refuerzo.

En el bucle de compensación presentado en la figura 4, se representa el comportamiento de los residuos no aprovechables y los aprovechables que no fueron aprovechados, en el cual la separación adecuada en la fuente juega un papel importante, debido a que si incrementan estos residuos disminuye la vida útil del relleno sanitario. En el bucle de refuerzo 1 en la figura 5, se observa la relación de la generación de electricidad con biogás y como esta contribuye a incrementar la vida útil del relleno y disminuir la contaminación.

En el bucle de refuerzo 2 en la figura 6 se presenta el mercado de la energía eléctrica no suplida por las plantas hidroeléctricas y el beneficio ambiental asociado al consumir en primera estancia la energía generada con biogás. Por último, En el bucle de refuerzo 3 que se muestra en la figura 7 se representa el beneficio tanto en emisiones GEI como en la vida útil del relleno.

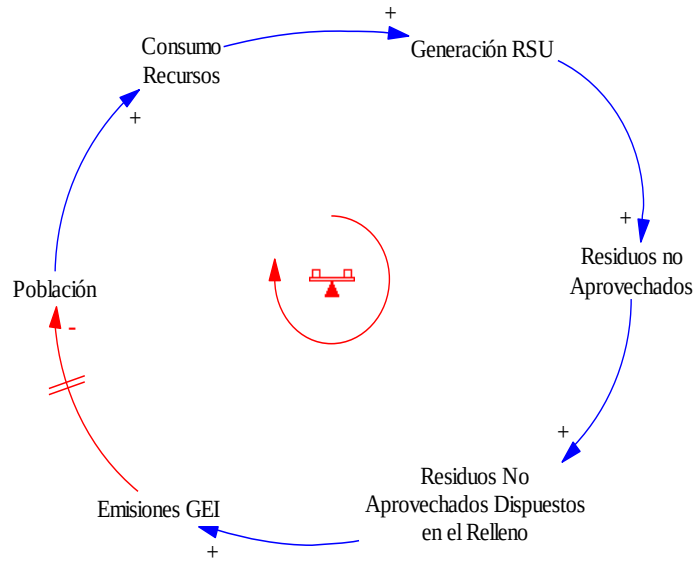
Sin embargo, el conjunto de las relaciones en estas variables influyen directamente en la vida útil del relleno sanitario y si la fracción de aprovechamiento de los residuos disminuye, esta se ve afectada negativamente, y a su vez, la sobreoferta de residuos sólidos urbanos en el relleno incrementa la contaminación que afecta la población.

**Figura 3. Diagrama de influencias**



**Fuente:** los Autores.

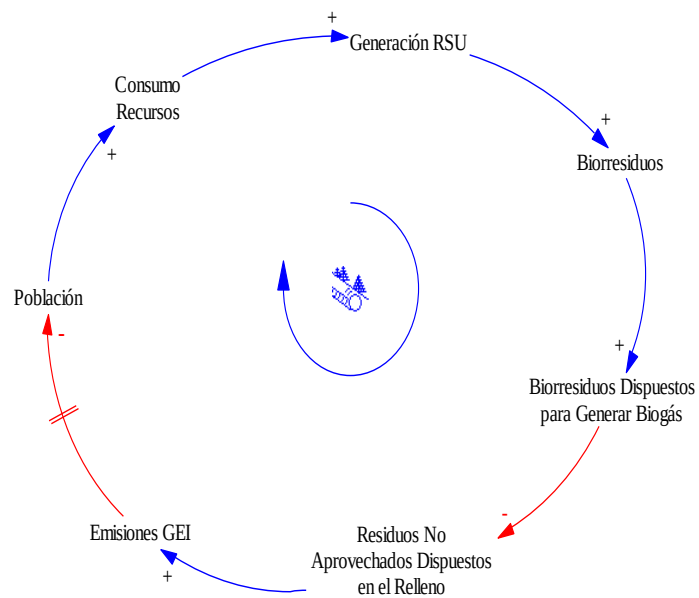
**Figura 4. Bucle de compensación.**



**Fuente:** los Autores.

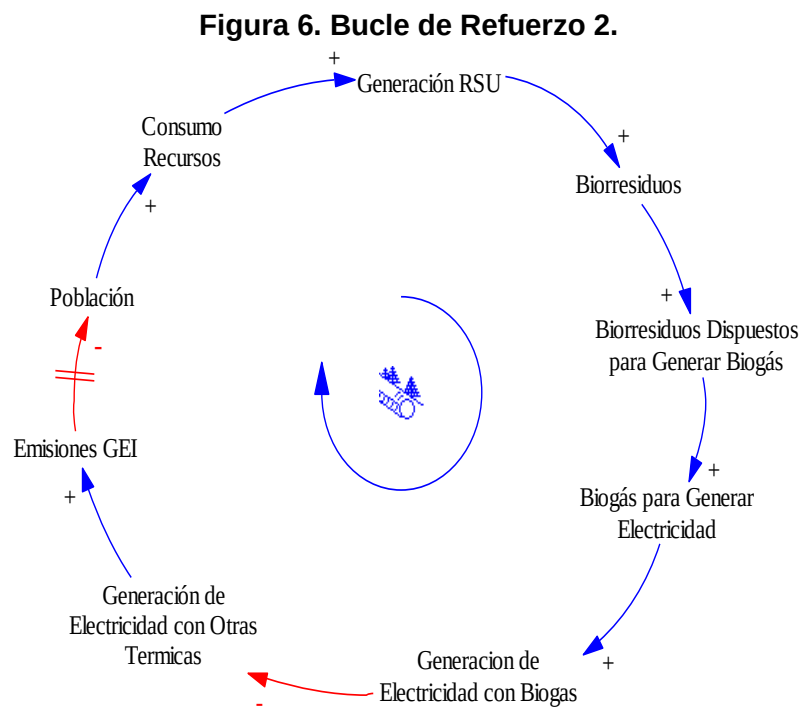
El bucle de compensación de la figura 4, relaciona la población que consume los recursos y genera los residuos, de los cuales, aquellos no aprovechables son dispuestos en el relleno liberando a la atmósfera emisiones de GEI, que a largo plazo afectan el crecimiento de la población.

**Figura 5. Bucle de Refuerzo 1.**



**Fuente:** los Autores.

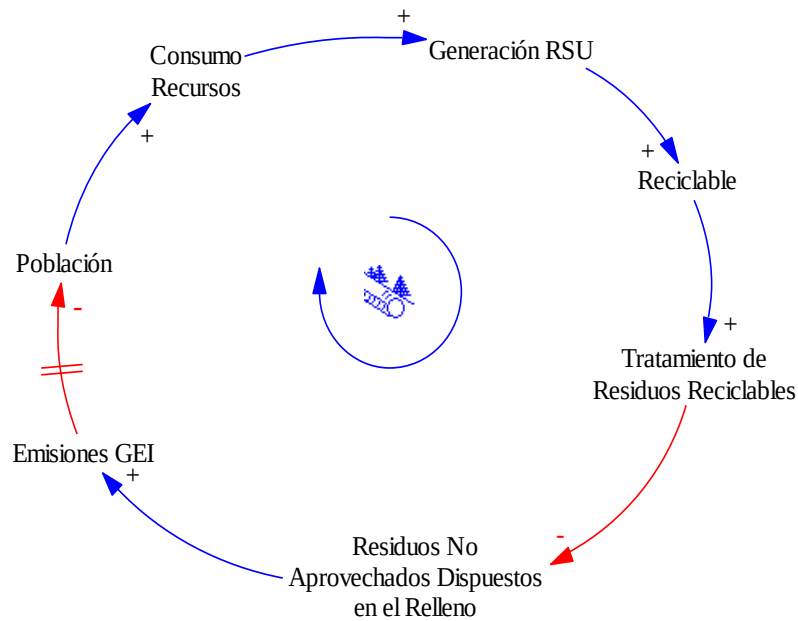
El bucle de refuerzo 1 que se muestra en la figura 5, involucra la relación entre la población que consume los recursos y genera los residuos. De los cuales, aquellos que poseen un componente orgánico, también conocidos como Biorresiduos, son dispuestos para generar biogás, con el fin de reducir eventualmente los residuos no aprovechados que van al relleno.



**Fuente:** los Autores.

El bucle de refuerzo 2 en la figura 6, representa la relación entre la población que consume los recursos y genera los residuos. De los cuales, aquellos que poseen un componente orgánico, también conocidos como Biorresiduos, son dispuestos para generar biogás, que posteriormente es procesado para generar electricidad y contribuir a la reducción del uso de energía eléctrica generada por otras térmicas, puesto que éstas, son las principales difusoras de emisiones de GEI, que con el tiempo afectan al crecimiento de la población.

**Figura 7. Bucle de refuerzo 3.**



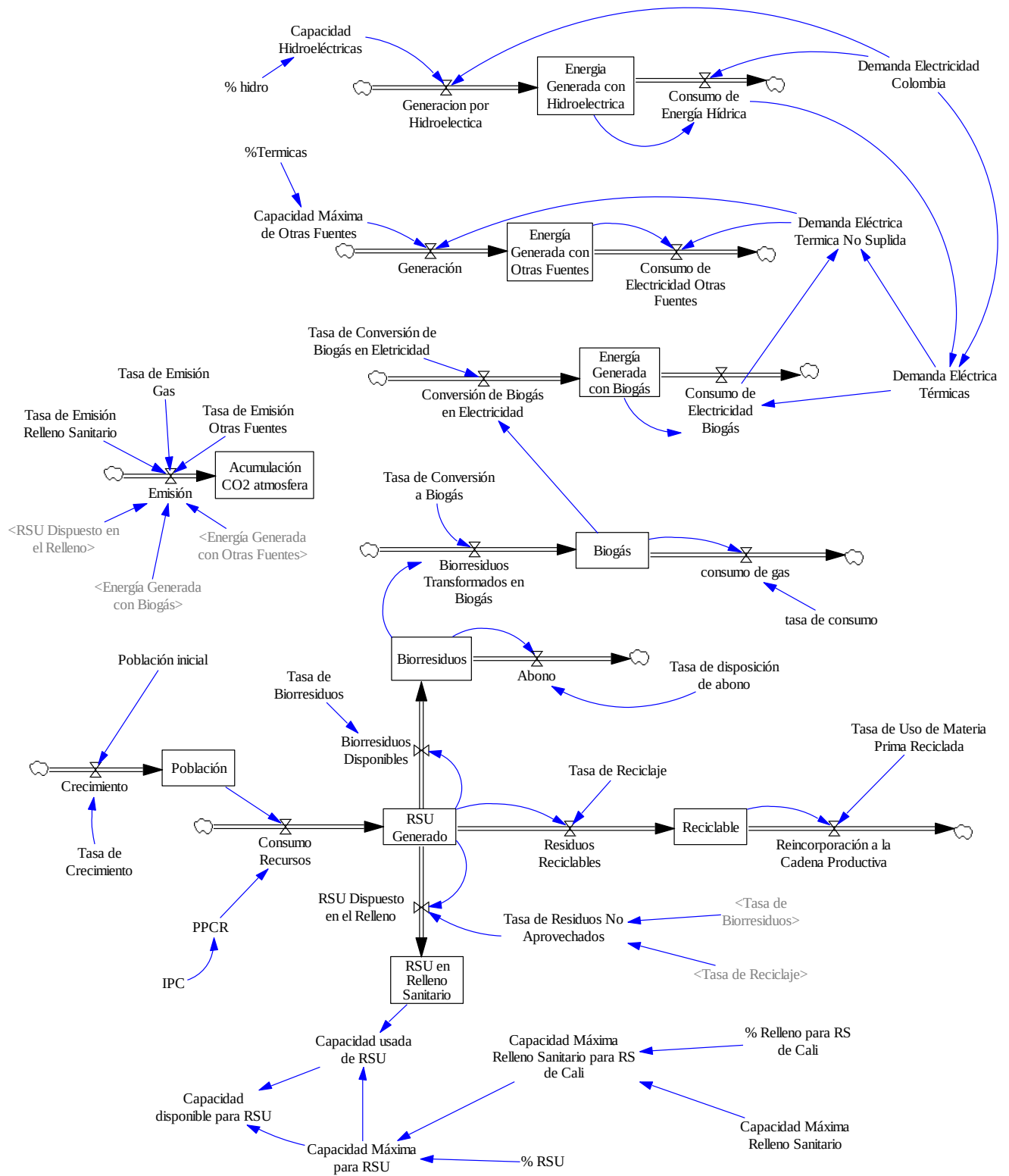
**Fuente:** los Autores.

El bucle de refuerzo 3 presentado en la figura 7, representa la relación entre la población que consume los recursos y genera los residuos. De los cuales, aquellos que son adecuados para su reciclaje, se tratan según sea el caso y se reincorporan a la cadena productiva, disminuyendo así los residuos dispuestos en el relleno que no se aprovecharon y las emisiones de GEI que son liberadas al ambiente, afectando a largo plazo el crecimiento de la población.

### 5.1.3. Definición de Variables

Considerando el diagrama de influencias presentado con anterioridad, se diseñó el diagrama de Forrester, que permitirá realizar la simulación del sistema planteado mediante el software Vensim® DSS, teniendo en cuenta cada una de las variables involucradas y la relación existente entre ellas. El periodo de simulación comprende 100 años, iniciando en el año 2012. El diagrama se muestra en la figura 8.

**Figura 8. Diagrama de Forrester.**



**Fuente: Los Autores.**

A continuación se describen y clasifican cada una de las variables representadas en el diagrama de Forrester con sus respectivos parámetros.

**Variables de nivel:** Estas variables en el diagrama de Forrester, también conocidas como variables de estado, hacen referencia al conjunto de éstas, cuya evolución es relevante para el estudio del sistema y su acumulación se ve reflejada en las acciones tomadas previamente.

- **Población:** Es la población urbana de la ciudad de Santiago de Cali, entre el año 2012 y el 2112. Unidad: Habitantes
- **RSU Generados:** Son los residuos sólidos urbanos producidos por la población durante el periodo de la simulación, de los cuales hacen parte los biorresiduos, residuos reciclables y los no aprovechables. Unidad: Tonelada.
- **RSU en Relleno Sanitario:** Son aquellos residuos sólidos urbanos que no fueron aprovechados o que por su composición no pueden ser aprovechados, por lo tanto, son almacenados en un sitio de disposición final adecuado, el cual la ciudad caso de estudio comparte con otros 15 municipios de la región. Unidad: Tonelada.
- **Biorresiduos:** Corresponden a la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos de la ciudad bajo estudio. Unidad: Toneladas.
- **Reciclable:** Residuos sólidos urbanos de la ciudad bajo estudio que son recuperables y sirven como materia prima para la fabricación de nuevos productos. Unidad: Toneladas.
- **Biogás:** Es el producto que resulta del proceso de transformación de los biorresiduos, mediante digestión anaerobia. Unidad: m<sup>3</sup>.
- **Energía Generada con Biogás:** Es aquella que usa el biogás de los biorresiduos como combustible para producir electricidad. Unidad: Mwh.
- **Energía Generada con Otras Fuentes:** Es el total de energía eléctrica generada por las demás fuentes térmicas (centrales pequeñas, medianas y grandes), que cuentan con capacidad instalada mayor o igual al 1% tales como carbón, combustóleo, gas, ACPM, cogeneración, JET-A1, mezcla de gas y carbón, mezcla de gas y JET-A1, menores Gas. Unidad: Mwh.

- **Energía Generada con Hidroeléctricas:** Es el total de electricidad generada por centrales hidroeléctricas. Unidad: Mwh.
- **Acumulación CO2 atmósfera:** Son las toneladas de CO2 que se acumulan en la atmósfera, procedentes de los residuos en el relleno sanitario, las centrales térmicas cuando generan electricidad y de la planta generadora de biogás a partir del componente orgánico de los RS.

**Variables de flujo:** Éstas definen las variaciones en los estados y caracterizan las acciones tomadas del sistema.

- **Crecimiento:** Es el aumento de la población de la ciudad de Santiago de Cali en el año t. Unidad: Habitantes/año.
- **Consumo Recursos:** Es la cantidad de RSU que genera anualmente la población de la ciudad de Santiago de Cali. Unidad: Ton/ año.
- **RSU Dispuesto en el Relleno:** Hace referencia a los RSU no aprovechados y no aprovechables que son dispuestos para ser transportados al relleno sanitario. Unidad: Ton/ año.
- **Residuos Reciclables:** Son aquellos RSU con característica reciclable, seleccionados para ser clasificados según sus propiedades. Unidad: Ton/ año.
- **Biorresiduos Disponibles:** Son la cantidad de RSU con componente orgánico, que pueden ser aprovechados como fuente de generación de biogás. Unidad: Ton/ año.
- **Abono:** Es el subproducto resultante del proceso de digestión anaeróbica, en la cual se genera el biogás. Unidad: Toneladas/ año.
- **Reincorporación a la Cadena Productiva:** Esta variable corresponde a los RSU reciclables que fueron clasificados y serán usados como insumo para fabricar nuevamente un producto. Unidad: Toneladas/ año.



- **Biorresiduos Transformados en Biogás:** Expresa la cantidad en metros cúbicos de biogás generado a partir de los biorresiduos que fueron aprovechados. Unidad:  $\text{m}^3/\text{toneladas}$ .
- **Consumo de gas:** Es la cantidad de biogás consumido para generar energía eléctrica. Unidad:  $\text{m}^3$ .
- **Conversión de Biogás en Electricidad:** Cantidad de energía eléctrica generada con biogás. Unidad:  $\text{Mw}/\text{m}^3$ .
- **Consumo de Electricidad Biogás:** Representa la cantidad de electricidad producida con biogás que satisface una fracción de la demanda no suplida por las centrales hidroeléctricas en el año t. Unidad:  $\text{Mw}/\text{año}$ .
- **Generación:** Equivale a la cantidad de energía eléctrica generada por las demás fuentes térmicas del país. Unidad:  $\text{Mw}/\text{año}$ .
- **Consumo de Electricidad Otras Fuentes:** Es el total anual de energía eléctrica usada para satisfacer la cuota restante de la demanda. Unidad:  $\text{Mw}/\text{año}$ .
- **Generación por Hidroeléctrica:** Es la cantidad anual de electricidad que generan en conjunto las centrales hidroeléctricas en todo el país. Unidad:  $\text{Mw}/\text{año}$ .
- **Consumo de Energía Hídrica:** Esta variable representa la cantidad de energía eléctrica consumida en el año t. Unidad:  $\text{Mw}/\text{año}$ .
- **Emisión:** Representa las emisiones de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera procedentes de los residuos dispuestos en el relleno sanitario de la ciudad bajo estudio, las centrales térmicas del país y la planta generadora de energía eléctrica a partir del biogás. Unidad: Toneladas  $\text{CO}_2/\text{año}$ .

**Variables Auxiliares:** Estas variables representan etapas o pasos en que se descompone el cálculo de una variable de flujo y que varían instantáneamente en respuesta a los valores que toman los niveles a lo largo del sistema.

- **Tasa de Crecimiento:** Es la tasa a la cual aumenta la población de la ciudad Santiago de Cali anualmente [45].

- **Población inicial:** Es el valor de la población de la ciudad de Santiago de Cali, de acuerdo con los informes del Departamento Administrativo de Planeación [23].
- **IPC:** Esta variable se importa desde el Excel, los ingresos por persona obtenidos por información secundaria [46].
- **PPCR:** Son las toneladas de RSU producidos anualmente por persona, con base en los informes de la alcaldía de Santiago de Cali [23].
- **% Relleno para RS de Cali:** Esta variable hace referencia a la proporción del relleno sanitario Colomba- El Guabal, que corresponde a la ciudad objeto de estudio para la disposición final de sus RS.
- **Capacidad Máxima Relleno Sanitario:** Son las toneladas de RS de Santiago de Cali y de otros 15 municipios, que está en capacidad de almacenar el relleno sanitario Colomba- El Guabal, para su disposición final.
- **Capacidad Máxima Relleno Sanitario para RS de Cali:** Son las toneladas de RS de Santiago de Cali, que está en capacidad de almacenar el relleno sanitario Colomba- El Guabal, para su disposición final. Esta variable, está condicionada al comportamiento del % Relleno para RS de Cali y la Capacidad Máxima Relleno Sanitario.
- **% RSU:** Es la proporción equivalente a los RSU que hacen parte de los RS.
- **Capacidad Máxima para RSU:** Son las toneladas de RSU de Santiago de Cali, que el relleno sanitario Colomba- El Guabal, tiene la capacidad de almacenar para su disposición final.
- **Tasa de Biorresiduos:** Es la fracción orgánica de los RSU.
- **Tasa de Reciclaje:** Es la proporción de RSU que son reciclables.
- **Tasa de Residuos No Aprovechados:** Es la proporción de RSU que no son aprovechables y los aprovechables no aprovechados. Está condicionado por la Tasa de Biorresiduos y la Tasa de Reciclaje
- **Tasa de Uso de Materia Prima Reciclada:** Es la fracción de uso de los RSU reciclables que serán usados como insumo para fabricar un producto.

- **Tasa de disposición de abono:** Expresa la tasa de utilización del subproducto derivado en el proceso de biodigestión para generar biogás, como fertilizante.
- **Tasa de Conversión a Biogás:** Es la proporción de metros cúbicos de Biogás producidos con 1 tonelada de Biorresiduo.
- **Tasa de Conversión de Biogás en Electricidad:** Es la proporción de energía eléctrica generada de Megavatio con un metro cúbico de Biogás.
- **Capacidad Máxima de Otras Fuentes:** Es la cantidad máxima de Megavatios energía eléctrica que generan las demás centrales eléctricas del país.
- **Capacidad Hidroeléctricas:** Es la cantidad máxima de energía eléctrica que generan las demás centrales térmicas del país.
- **Demanda Electricidad Colombia:** Pronóstico de la cantidad de Megavatios por año que serán requeridos por la población Colombiana. Unidad: Mw/año.
- **Tasa de Emisión Gas:** Son las toneladas de CO<sub>2</sub> emitidos por Megavatio producido.
- **Tasa de Emisión Relleno Sanitario:** Son las toneladas de CO<sub>2</sub> emitidos por los residuos dispuestos en el vertedero.
- **Tasa de Emisión Otras Fuentes:** Son las toneladas de CO<sub>2</sub> emitidos por Megavatio producido.
- **Porción Aportada por Hidroeléctricas:** Es la fracción de la participación anual de las plantas hidroeléctricas en Colombia basado en datos históricos.
- **Porción Aportada por Térmicas:** Es la fracción restante de la participación anual de las plantas hidroeléctricas en Colombia basado en datos históricos.

#### **Variables de validación**

Para dar cumplimiento al objetivo general de la investigación, la validación del modelo desarrollado se logró mediante el diseño de variables que permitan visualizar la información y los resultados deseados.

- **Capacidad disponible para RSU:** Es la diferencia entre la capacidad máxima para RSU y la capacidad usada RSU, esta variable está condicionada por Capacidad usada de RSU y Capacidad Máxima para RSU.
- **Capacidad usada de RSU:** Representa las toneladas de RSU de la ciudad Santiago de Cali que fueron dispuestos en el relleno sanitario y se expresa como el mínimo entre la Capacidad Máxima para RSU y RSU en Relleno Sanitario.
- **Demanda Eléctrica Térmica No Suplida:** Representa el pronóstico de la cantidad de Megavatio por año de la demanda eléctrica de Colombia que no fueron suplidos por las centrales hidroeléctricas y planta de biogás. Unidad: Mw/ año.
- **Demanda Eléctrica Térmicas:** Equivale al pronóstico de la cantidad de Megavatio por año de la demanda eléctrica de Colombia que no fueron suplidos por las centrales hidroeléctricas. Unidad: Mw/ año.

**Tiempo Final:** 2112

**Tiempo inicial:** 2012

**Paso del Tiempo:** 1

## 5.2. Supuestos

- La tasa de crecimiento poblacional de la ciudad de Santiago de Cali se estima en 1,6% anual [45].
- La proporción de cada elemento del que se componen los RSR será constante y fueron tomados de un estudio regional documentado bibliográficamente [47].
- No fueron contempladas en el modelo dinámico las plantas generadoras de tipo eólicas, solares, acpm ni Diesel debido a que en Colombia aun no representan una porción considerable para satisfacer la demanda, es decir, aquellos inferiores al 1%.
- Existe separación en la fuente de los residuos sólidos residenciales de la ciudad de Santiago de Cali, es decir que cada usuario del servicio recolector de residuos, dispone de ellos ya previamente clasificados.
- La capacidad de las plantas generadoras de electricidad con otras fuentes se considera constante y competente para suplir la demanda restante que no es suplida por las plantas hidroeléctricas.
- La demanda de electricidad en Colombia es suplida en primera instancia por las generadoras hidroeléctricas, si ésta no lograr ser abastecida en su totalidad, entonces, en segunda instancia es suplida por la generación a partir de biogás. Por último, si no ocurren las dos situaciones mencionadas, la demanda restante que no es suplida en su totalidad, es cubierta por las plantas térmicas.
- La demanda de energía eléctrica de Colombia siempre será suplida, por ende, no existe desabastecimiento.
- Se plantearon tres escenarios climáticos, los cuales son clima medio, lluvias y sequía. Ser dará una explicación detallada de cada uno posteriormente.
- Se asume que la generación de las hidroeléctricas es constante para cada escenario climático.

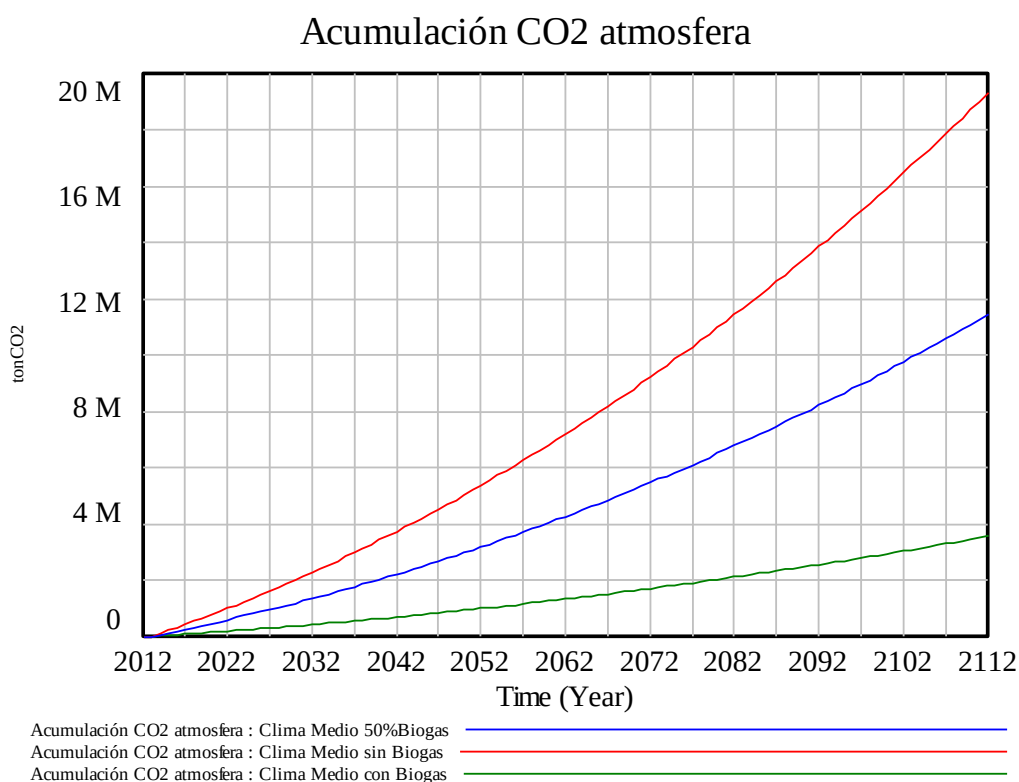
- Los residuos sólidos reciclables son clasificados, posteriormente reciben el tratamiento pertinente para finalmente ser reincorporados a la cadena productiva. Estos residuos siempre serán aprovechados.
- El valor inicial de las Emisiones de CO<sub>2</sub> es cero, ya que el modelo dinámico no disminuye las emisiones existentes en la atmósfera.

## 6. RESULTADOS

### 6.1. Escenario 1: Clima Medio

Se promedió la porción de participación histórica de las plantas hidroeléctricas y se asume que uno menos esta porción es igual a la fracción de participación de las otras fuentes térmicas. Se compara cuando se genera energía eléctrica a partir del componente orgánico de los residuos sólidos urbanos y cuando estos no son aprovechados.

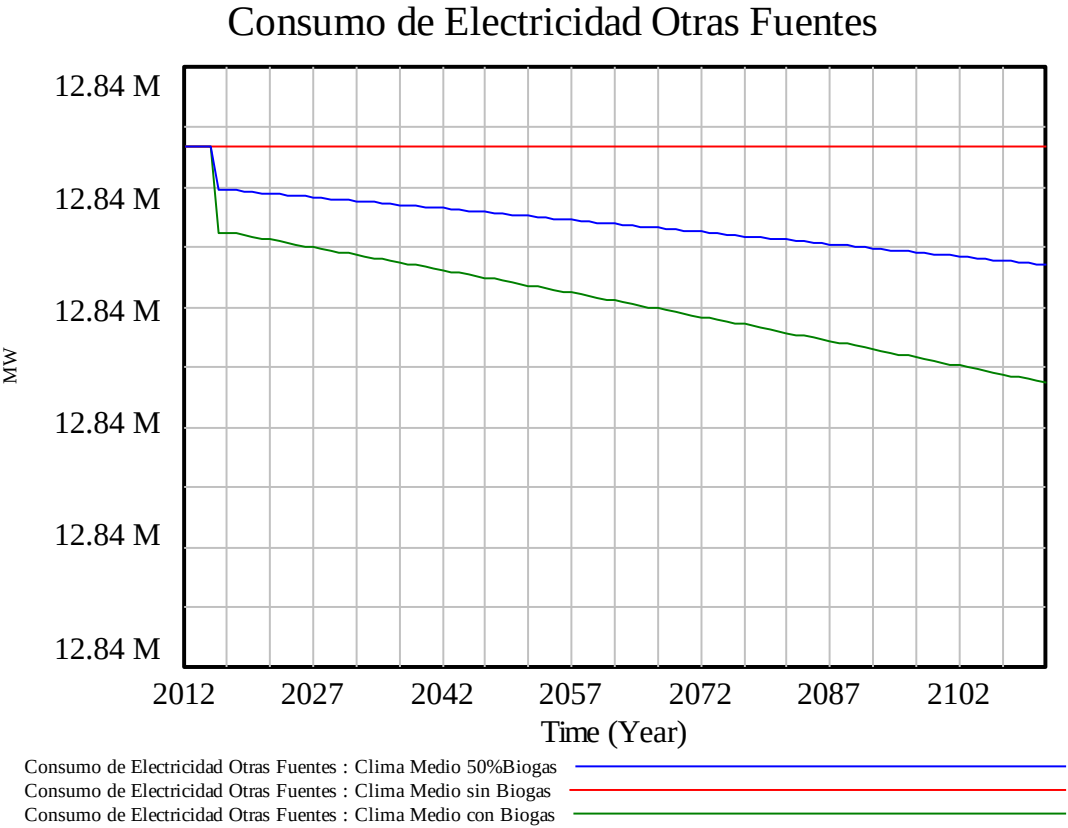
**Gráfica 1. Acumulación CO<sub>2</sub> Atmósfera Clima Medio**



**Fuente:** Los Autores.

En la gráfica 1, se compara la acumulación de CO<sub>2</sub> en la atmósfera cuando se utiliza biogás para generar electricidad, aprovechando para ello el 50 ó 100 % de los biorresiduos y cuando definitivamente no se genera a partir de biogás, esto, bajo el escenario de clima promedio, es decir, que no se presenta sequía en exceso ni tampoco abundantes lluvias. Se observa que al generar electricidad con biogás aprovechando los biorresiduos en su totalidad o solo el 50 %, se obtiene una disminución promedio del 81,6 y 40,8%, respectivamente, en las toneladas de CO<sub>2</sub> acumuladas en la atmósfera con relación a la generación de electricidad que no se hace a partir de biogás.

**Gráfica 2. Consumo de Electricidad Otras Fuentes clima medio**

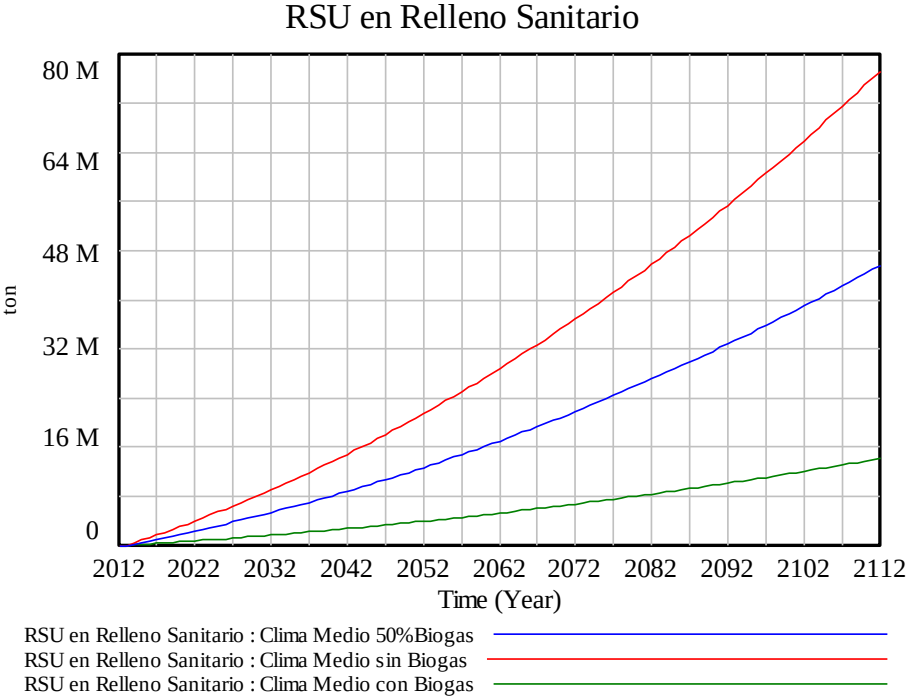


**Fuente:** Los Autores

La Graf 2 representa el consumo de electricidad que generan las otras fuentes térmicas. En esta gráfica se observa que la demanda suplida por las otras plantas de térmicas en el año 2112 se reduce debido a que una fracción de esta es suplida

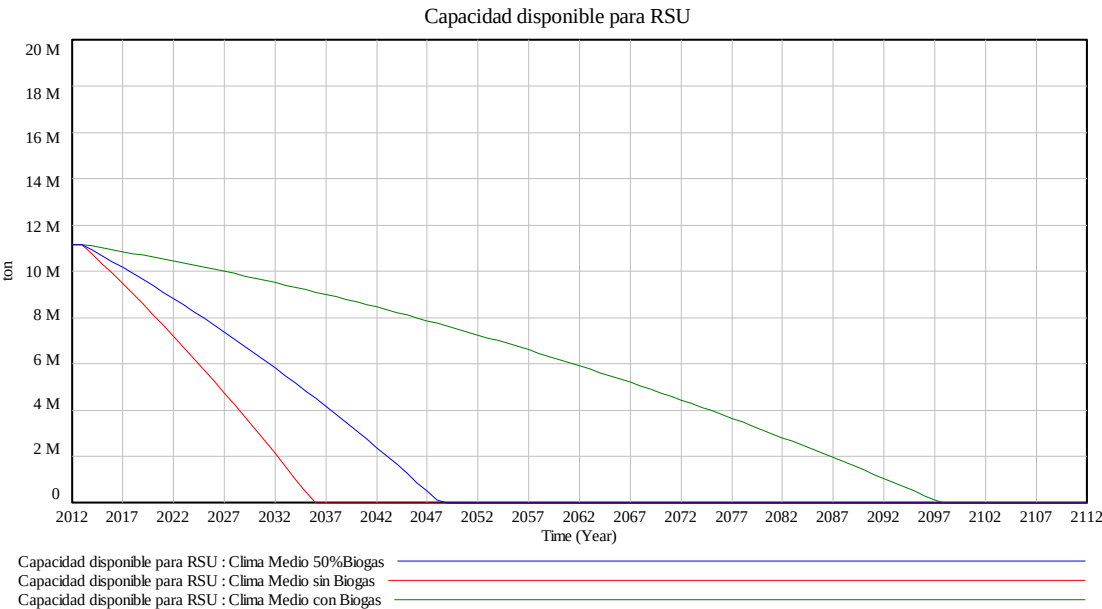
en aproximadamente 0,00061 y 0,00031 % por la planta de electricidad con biogás, cuando se aprovecha el 100 y el 50 % de los biorresiduos, respectivamente.

**Gráfica 3. RSU en Relleno Sanitario Clima Medio**



**Fuente:** Los Autores

**Gráfica 4. Vida Útil del Relleno Sanitario Colomba-El Guabal con Clima Medio**



**Fuente:** Los Autores

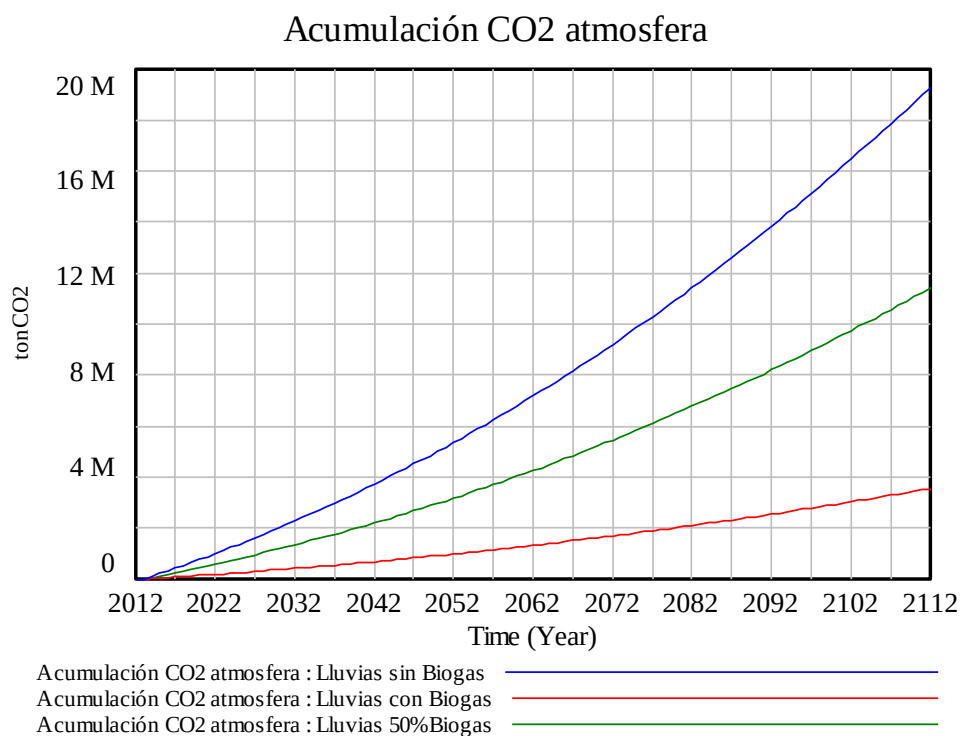


En las Graf 3 y 4, se percibe coherencia en los resultados que arroja el modelo puesto que al aumentar los residuos sólidos dispuestos en el relleno sanitario, se reduce la vida útil de éste. De acuerdo con las últimas dos gráficas, si los biorresiduos no son aprovechados, el relleno será clausurado en el año 2035, sin embargo, cuando se hace un uso adecuado del 100% de los biorresiduos para generar biogás, la vida útil del relleno se acrecienta en 62 años que cuando no son aprovechados. También, se estima que la vida útil del relleno cuando se dispone del 50% de biorresiduos para generar biogás es 13 años mayor.

## 6.2. Escenario 2: Temporada de Lluvias

Se realizó la segunda simulación variando los parámetros de la proporción aportada por la generación de energía eléctrica con hidroeléctrica y con otras fuentes térmicas, asignando el mayor valor registrado históricamente para las hidroeléctricas y el menor para las otras fuentes térmicas. Los resultados se presentan a continuación.

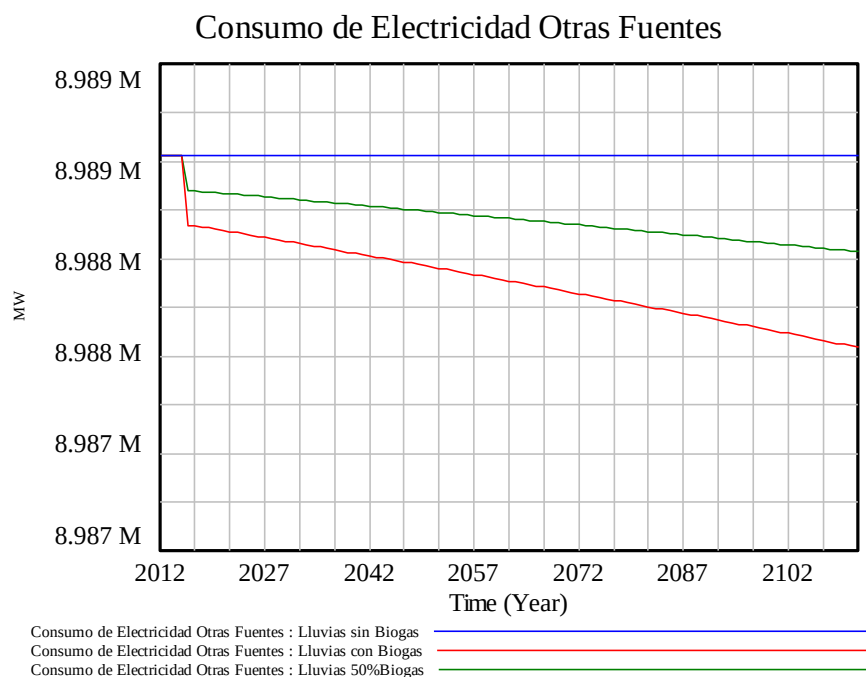
**Gráfica 5. Acumulación CO2 en la atmosfera con lluvias**



**Fuente:** Los Autores

En la gráfica 5 se observa un comportamiento similar al presentado en el primer escenario. En temporada de lluvias, la acumulación de CO<sub>2</sub> en la atmósfera por la generación de electricidad a partir de biogás sigue siendo menor que si solo se aprovechara el 50% o nada de los biorresiduos para tal propósito.

**Gráfica 6. Consumo de Electricidad con Otras Fuentes Térmicas en Temporada de Lluvias**



**Fuente:** Los Autores.

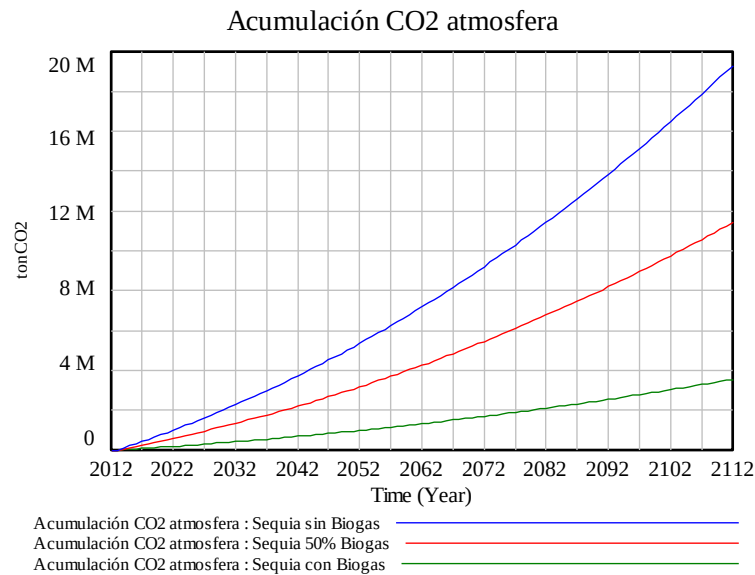
La gráfica 6, muestra el comportamiento de la demanda de electricidad a partir de otras fuentes térmicas en temporada de lluvias. Ésta se observa disminuida por la generación de energía eléctrica a partir de biogás aprovechando ya sea el 50 o 100% de los biorresiduos.

### 6.3. Escenario 3: Temporada de Sequía

Por último, al igual que en el escenario anterior se simuló cambiando los parámetros de la proporción aportada por la generación de energía eléctrica con hidroeléctrica y con otras fuentes térmicas, pero asignando el valor inferior registrado históricamente del aporte en las hidroeléctricas y el valor superior de participación

en las otras fuentes térmicas. Los resultados obtenidos se presentan a continuación.

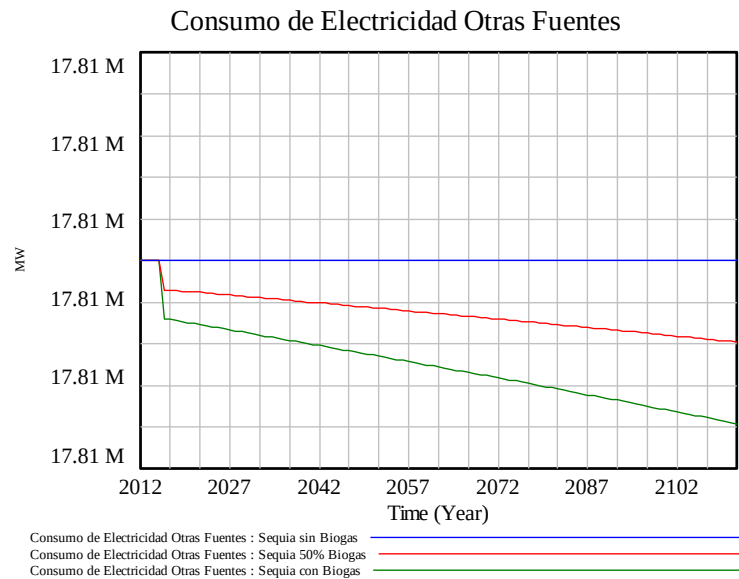
**Gráfica 7. Acumulación de CO2 en la Atmosfera en Temporada de Sequía**



**Fuente:** Los Autores.

En la gráfica 7 se muestra la acumulación de CO2 en la atmosfera en temporada de sequía variando el aprovechamiento de los biorresiduos en un 100, 50 y 0 % para generar energía eléctrica con biogás. Se observa que a mayor generación de energía con biogás menor contaminación a pesar que en este escenario se emplea una porción elevada de generación de electricidad con fuentes otras térmicas.

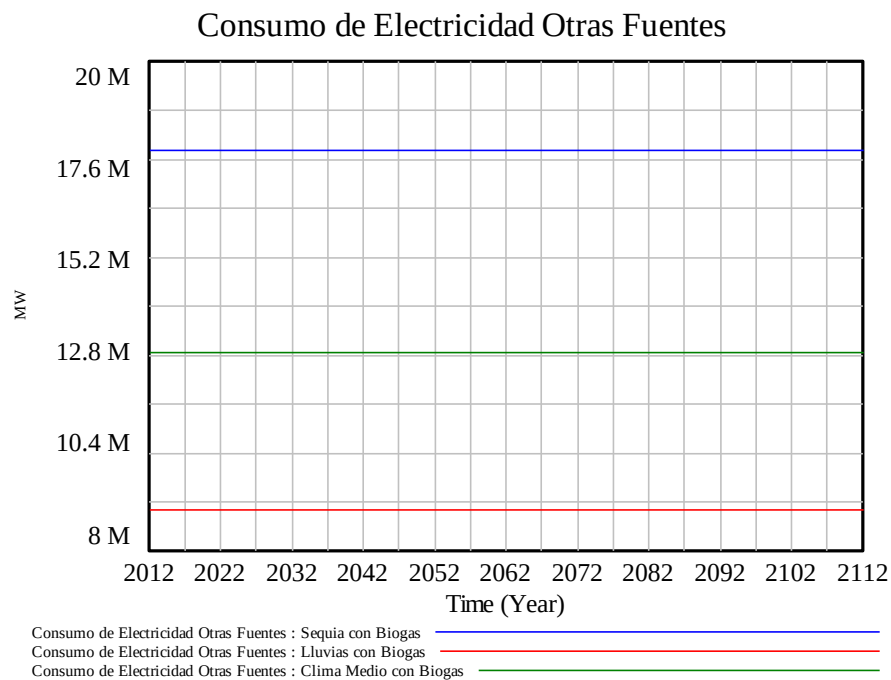
**Gráfica 8. Consumo de Electricidad con Otras Fuentes Térmicas en Temporada de Sequía.**



**Fuente:** Los Autores.

El consumo de electricidad procedente de otras fuentes térmicas en temporada de sequía se representa en la gráfica 8. Se percibe que la fracción del mercado de la demanda de energía eléctrica suplida por las otras fuentes térmicas no es afectada significativamente por la generación de electricidad con biogás, esto se debe a que la planta no posee la capacidad suficiente para ser tomada en cuenta.

**Gráfica 9. Comparación del Consumo de Electricidad de Otras Fuentes Térmicas en los Tres Escenarios.**



**Fuente:** Los Autores.

El consumo de los tres escenarios cuando se genera electricidad con biogás se muestra en la gráfica 9. Se observa que en temporada de lluvias, la generación de con otras fuentes térmicas es menor que cuando hay sequía, esto se debe a que las plantas hidroeléctricas durante el periodo de sequía disminuyen su capacidad y las plantas térmicas suplen esta fracción.

## CONCLUSIONES

En los tres escenarios se observó que el clima no es una variable que influya significativamente en la acumulación de CO<sub>2</sub> en la atmosfera

La generación de energía eléctrica con otras fuentes térmicas podría ser afectada en mayor medida si se aumentara la capacidad de la planta generadora de electricidad con biogás a partir del componente orgánico de los residuos, por otro lado esto también afectaría de manera positiva la acumulación de CO<sub>2</sub> en la atmosfera.

La generación de electricidad con biogás es una opción viable siempre y cuando se realice de una manera segura y eficiente, de lo contrario esto podría cambiar los resultados de la simulación.

La ciudad de Santiago de Cali podría abastecer en 100 años la demanda eléctrica del 2012 en 0,37% con generación de energía eléctrica a partir del componente orgánico de sus residuos.

Un elemento que contribuye significativamente a la prolongación de la útil del relleno sanitario es el reciclaje de los residuos, si esta variable no se tiene en cuenta los resultados de la simulación con respecto a este factor cambiarían drásticamente.

Otro aspecto importante que contribuirá con el éxito de una propuesta como esta es la separación de los residuos sólidos urbanos en la fuente; dado que si dicha separación no se realiza, deberá considerarse un elemento más en el sistema el cual sería una planta de separación de los residuos.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] “Derogado por el art. 120, Decreto Nacional 2981 de 2013.” [Online]. Available:  
<http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=8434>.  
[Accessed: 23-Dec-2015].
- [2] D. C. C. ASCANIO, “ANÁLISIS DEL SECTOR DE ENERGÍA ELÉCTRICA COLOMBIANO Y REGIONAL NEGOCIACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA CEMEX COLOMBIA S.A.,” 2013.
- [3] L. F. HENAO, LUZ HELENA SARMIENTO, and J. M. SANTOS, “DECRETO 2981 DE 2013,” 2013. [Online]. Available:  
<http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=56035#120>.  
[Accessed: 23-Dec-2015].
- [4] “RESOLUCIÓN 1045 DE 2003.” [Online]. Available:  
<http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=9998#0>.  
[Accessed: 23-Dec-2015].
- [5] C. R. González-Rubio, “DECRETO 1505 DE 2003.”
- [6] S. Teixeira, E. Monteiro, V. Silva, and A. Rouboa, “Prospective application of municipal solid wastes for energy production in Portugal,” *Energy Policy*, vol. 71, pp. 159–168, Aug. 2014.
- [7] J. Jaramillo, “Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales,” Lima, Perú, 2002.
- [8] M. a. Sufian and B. K. Bala, “Modelling of electrical energy recovery from urban solid waste system: The case of Dhaka city,” *Renew. Energy*, vol. 31, no. 10, pp. 1573–1580, Aug. 2006.
- [9] C. Ryu, “Potential of Municipal Solid Waste for Renewable Energy Production and Reduction of Greenhouse Gas Emissions in South Korea,” *J. Air Waste Manage. Assoc.*, vol. 60, no. 2, pp. 176–183, Feb. 2010.
- [10] L. F. Marmolejo Rebellón, “Caracterización de los residuos sólidos residenciales generados en el municipio de Santiago de Cali,” 2006.
- [11] J. Arvizu and J. Huacuz, “Biogás de rellenos sanitarios para producción de electricidad,” *Boletín IIE*, pp. 118–123, 2003.
- [12] Q. Aguilar-Virgen, P. Taboada-González, S. Ojeda-Benítez, and S. Cruz-Sotelo, “Power generation with biogas from municipal solid waste: Prediction of gas generation with in situ parameters,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 30, pp. 412–419, Feb. 2014.
- [13] J. Pinto Nolla, “Mejora de Acceso a Mercados Energéticos Fase I – Colombia Estudio Integral de la Situación Actual y Perspectivas del Mercado Energético de Colombia,” 2013.
- [14] S. de N. de las N. Unidas, “UCentro de noticias de la ONU en español - La

- población mundial crecerá en mil millones en la próxima década,” 2013. [Online]. Available: <http://www.un.org/spanish/News/story.asp?newsID=26703#.VF2SBjSG9bN>. [Accessed: 08-Nov-2014].
- [15] Dinero, “Fiebre de energía - Dinero.com,” 2009. [Online]. Available: <http://www.dinero.com/caratula/edicion-impresa/articulo/fiebre-energia/85779>. [Accessed: 08-Nov-2014].
  - [16] F. Zorrilla, *“Conociendo a Dios a través de la Ciencia”: “Realidades que debes saber.”* Palibrio, 2011.
  - [17] GREENPEACE, “Nuevas tecnologías para el tratamiento de residuos urbanos: viejos riesgos y ninguna solución,” 2011.
  - [18] D. Moratorio, I. Rocco, and M. Castelli, “Conversión de Residuos Sólidos Urbanos en Energía Converting Municipal Solid Waste into energy,” vol. 10, pp. 115–126, 2012.
  - [19] J. R. VILORIA, *Energías renovables. Lo que hay que saber.* Ediciones Paraninfo, S.A., 2013.
  - [20] F. M. Hernández, *Tratamiento de residuos y generación de energía renovable en el sector industrial: Producción de biogás con suero de queso como sustrato.* Francisco M. Hernández, 2014.
  - [21] MinMinas, “INFORME MENSUAL DE VARIABLES DE GENERACIÓN Y DEL MERCADO ELÉCTRICO COLOMBIANO,” no. 69, 2015.
  - [22] H. H. Herrera, “Generacion de energia a traves de biogas en colombia,” Universidade Federal da Integração Latino Americana, 2013.
  - [23] G. Escobar Morales, “Cali en cifras,” *Cali Dep. Adm. Planeación*, 2013.
  - [24] E. A. Lagarda, “Introducción a la dinámica de sistemas.”
  - [25] J. Aracil and F. Gordillo, “Introducción a las dinámica de sistemas,” in *Dinámica de sistemas*, Primera Ed., Isdefe, Ed. Madrid, 1995.
  - [26] A. Fernández Colomina and M. Sánchez Osuna, “Guia para la gestión integral de los residuos sólidos urbanos,” 2007.
  - [27] G. Sánchez Olguín, “Gestion integral residuos urbanos en los municipios de actopan, san salvador y el arenal del estado de hidalgo,” Universidad Autonoma del Estado de Hildago, 2007.
  - [28] L. A. Rodríguez and C. X. Ramos Hidalgo, “Disposición Final de Residuos Sólidos en Colombia 2013,” Bogotá D.C, 2013.
  - [29] “Glosario Terminos : CORPONARINO.” .
  - [30] S. R. Valdés, *Gestión de Residuos Sólidos Técnica - Salud - Ambiente - Competencia Gestión de Residuos Sólidos.* .
  - [31] M. SÁNCHEZ CÉSPEDES, “MODELO DE VALORACIÓN DE RIESGO EN LA GESTIÓN DE CONTRATOS DE VENTA DE ENERGÍA ELÉCTRICA,” UNIVERSIDAD DEL VALLE, 2012.



- [32] J. L. Arvizu Fernández, “La basura como recurso energético. Situación actual y prospectiva en México,” *Boletín IIE*, pp. 36–44, 2010.
- [33] MinEducación, “Colombia una potencia en energías alternativas.” .
- [34] UPME, “UNA VISION DEL MERCADO ELECTRICO COLOMBIANO,” 2004.
- [35] A. Cecilia, E. Atehortúa, and S. B. Botero, “Caracterización del mercado de energía eléctrica para usuarios no regulados en Colombia,” 2006.
- [36] MinMinas, “ENERGÍA ELÉCTRICA,” 2013.
- [37] IEA, “WORLD ENERGY,” IEA, 2012.
- [38] Ambientum, “Medio Ambiente - Revista Ambientum - Generación de residuos sólidos urbanos,” *Redacción ambientum*, 2003. [Online]. Available: [http://www.ambientum.com/revista/2003\\_05/RESIDUOS.htm](http://www.ambientum.com/revista/2003_05/RESIDUOS.htm). [Accessed: 08-Nov-2014].
- [39] A. Patiño, “La gestión de los residuos sólidos urbanos en la ciudad de Hannover: un modelo exitoso,” *An. Geogr. la Univ. Complut.*, 2008.
- [40] Instituto Nacional de Ecología, *Guía para la gestión integral de los residuos solidos municipales*. Instituto Nacional de Ecología, 2001.
- [41] E. A. Scano, C. Asquer, A. Pistis, L. Ortu, V. Demontis, and D. Cocco, “Biogas from anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes: Experimental results on pilot-scale and preliminary performance evaluation of a full-scale power plant,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 77, pp. 22–30, Jan. 2014.
- [42] C. A. Pretel Arango, “Evaluación del ciclo de vida útil de un relleno sanitario aplicando un modelo de dinámica de sistemas caso estudio: Colomba - El Guabal,” 2013.
- [43] P. D. Haimovici, E. H. Maimbil, and N. H. S. Romera, “Modelo de Generación Eléctrica,” 2012.
- [44] J. Aracil and F. Gordillo, *Dinámica de sistemas*. Madrid, 1997.
- [45] ORMET, “Estructura Socioeconómica del Valle del Cauca: un análisis del mercado laboral de Cali y su Área Metropolitana,” 2012.
- [46] EL BANCO MUNDIAL, “PIB per cápita (US\$ a precios actuales) | Datos | Tabla,” 2015. [Online]. Available: <http://datos.bancomundial.org/indicador/NY.GDP.PCAP.CD?page=1>. [Accessed: 20-Dec-2015].
- [47] L. F. Marmolejo, “Caracterización de los residuos sólidos residenciales generados en el municipio de Santiago de Cali.”

## ANEXOS

**ANEXO 1.** Tabla del pronóstico a partir de la regresión lineal de ingreso per cápita en Colombia.

| <b>AÑO</b>  | <b>IPC (COP)</b> | <b>AÑO</b>  | <b>IPC (COP)</b> | <b>AÑO</b>  | <b>IPC (COP)</b> | <b>AÑO</b>  | <b>IPC (COP)</b> | <b>AÑO</b>  | <b>IPC (COP)</b> |
|-------------|------------------|-------------|------------------|-------------|------------------|-------------|------------------|-------------|------------------|
| <b>2012</b> | 7.885,10         | <b>2032</b> | 18.705,49        | <b>2052</b> | 30.030,64        | <b>2072</b> | 41.355,79        | <b>2092</b> | 52.680,94        |
| <b>2013</b> | 8.028,00         | <b>2033</b> | 19.271,74        | <b>2053</b> | 30.596,89        | <b>2073</b> | 41.922,05        | <b>2093</b> | 53.247,20        |
| <b>2014</b> | 7.903,90         | <b>2034</b> | 19.838,00        | <b>2054</b> | 31.163,15        | <b>2074</b> | 42.488,30        | <b>2094</b> | 53.813,46        |
| <b>2015</b> | 9.079,11         | <b>2035</b> | 20.404,26        | <b>2055</b> | 31.729,41        | <b>2075</b> | 43.054,56        | <b>2095</b> | 54.379,71        |
| <b>2016</b> | 9.645,36         | <b>2036</b> | 20.970,52        | <b>2056</b> | 32.295,67        | <b>2076</b> | 43.620,82        | <b>2096</b> | 54.945,97        |
| <b>2017</b> | 10.211,62        | <b>2037</b> | 21.536,77        | <b>2057</b> | 32.861,92        | <b>2077</b> | 44.187,08        | <b>2097</b> | 55.512,23        |
| <b>2018</b> | 10.777,88        | <b>2038</b> | 22.103,03        | <b>2058</b> | 33.428,18        | <b>2078</b> | 44.753,33        | <b>2098</b> | 56.078,49        |
| <b>2019</b> | 11.344,14        | <b>2039</b> | 22.669,29        | <b>2059</b> | 33.994,44        | <b>2079</b> | 45.319,59        | <b>2099</b> | 56.644,74        |
| <b>2020</b> | 11.910,39        | <b>2040</b> | 23.235,55        | <b>2060</b> | 34.560,70        | <b>2080</b> | 45.885,85        | <b>2100</b> | 57.211,00        |
| <b>2021</b> | 12.476,65        | <b>2041</b> | 23.801,80        | <b>2061</b> | 35.126,96        | <b>2081</b> | 46.452,11        | <b>2101</b> | 57.777,26        |
| <b>2022</b> | 13.042,91        | <b>2042</b> | 24.368,06        | <b>2062</b> | 35.693,21        | <b>2082</b> | 47.018,36        | <b>2102</b> | 58.343,52        |
| <b>2023</b> | 13.609,17        | <b>2043</b> | 24.934,32        | <b>2063</b> | 36.259,47        | <b>2083</b> | 47.584,62        | <b>2103</b> | 58.909,77        |
| <b>2024</b> | 14.175,42        | <b>2044</b> | 25.500,58        | <b>2064</b> | 36.825,73        | <b>2084</b> | 48.150,88        | <b>2104</b> | 59.476,03        |
| <b>2025</b> | 14.741,68        | <b>2045</b> | 26.066,83        | <b>2065</b> | 37.391,99        | <b>2085</b> | 48.717,14        | <b>2105</b> | 60.042,29        |
| <b>2026</b> | 15.307,94        | <b>2046</b> | 26.633,09        | <b>2066</b> | 37.958,24        | <b>2086</b> | 49.283,39        | <b>2106</b> | 60.608,55        |
| <b>2027</b> | 15.874,20        | <b>2047</b> | 27.199,35        | <b>2067</b> | 38.524,50        | <b>2087</b> | 49.849,65        | <b>2107</b> | 61.174,80        |
| <b>2028</b> | 16.440,46        | <b>2048</b> | 27.765,61        | <b>2068</b> | 39.090,76        | <b>2088</b> | 50.415,91        | <b>2108</b> | 61.741,06        |
| <b>2029</b> | 17.006,71        | <b>2049</b> | 28.331,86        | <b>2069</b> | 39.657,02        | <b>2089</b> | 50.982,17        | <b>2109</b> | 62.307,32        |
| <b>2030</b> | 17.572,97        | <b>2050</b> | 28.898,12        | <b>2070</b> | 40.223,27        | <b>2090</b> | 51.548,42        | <b>2110</b> | 62.873,58        |
| <b>2031</b> | 18.139,23        | <b>2051</b> | 29.464,38        | <b>2071</b> | 40.789,53        | <b>2091</b> | 52.114,68        | <b>2111</b> | 63.439,83        |
|             |                  |             |                  |             |                  |             |                  | <b>2112</b> | 64.006,09        |