



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

ELABORACIÓN DE UN MODELO DINÁMICO DE SISTEMAS PARA LA  
GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS ASOCIADOS AL AUMENTO  
POBLACIONAL Y OTROS FACTORES DE INFLUENCIA, APLICADO AL  
CANTÓN RUMIÑAHUI.

AUTOR

Bryan Guillermo Ayala Córdova

AÑO

20202



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

ELABORACIÓN DE UN MODELO DINÁMICO DE SISTEMAS PARA LA  
GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS ASOCIADOS AL AUMENTO  
POBLACIONAL Y OTROS FACTORES DE INFLUENCIA, APLICADO AL  
CANTÓN RUMIÑAHUI.

Trabajo de titulación presentado en conformidad con los requisitos establecidos  
para optar por el título de Ingeniero Ambiental .

Profesor Guía

Autor

Bryan Guillermo Ayala Córdova

Año

2020

## DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

"Declaro haber dirigido este trabajo, Elaboración de un modelo dinámico de sistemas para la generación de residuos sólidos asociados al aumento poblacional y otros factores de influencia, aplicado al cantón Rumiñahui, a través de reuniones periódicas con el estudiante Bryan Guillermo Ayala Córdova, en el semestre 20202, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación"

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Daniel Hernán Hidalgo Villalba', is written over several horizontal lines.

Daniel Hernán Hidalgo Villalba

Magister en Ciencias, Especialización Ingeniería  
Ambiental C.I: 1801914449

## DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR

"Declaro haber revisado este trabajo, Elaboración de un modelo dinámico de sistemas para la generación de residuos sólidos asociados al aumento poblacional y otros factores de influencia, aplicado al cantón Rumiñahui, a través de reuniones periódicas con el estudiante Bryan Guillermo Ayala Córdova, en el semestre 20202, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación"



---

Santiago Daniel Piedra Burgos

Máster en Hidrociencias e Ingeniería

C.I: 1715384150

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

"Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes."



---

Bryan Guillermo Ayala Córdova

CI: 1724144256

## **AGRADECIMIENTOS**

Doy gracias a la vida, a los colores de la mañana y al sol, a la música y a la poesía. Doy gracias a mis amigos los chavex, quienes han hecho de todo esto un viaje inolvidable y divertido. Agradezco a los maestros que fueron capaces de mostrarse humanos e iguales a nosotros. Agradezco a mi madre Djenana, de quien he aprendido la aceptación de la realidad y la lucha por los sueños. A mi padre Guillermo, quien me enseñó que el verdadero aprendizaje de la vida llega a través de los errores que no volvemos a cometer. A mis ñaños Jair y Kevin, que cuidan de mí como su hermano menor. Al Pirata que es mi guía espiritual en este mundo. Y Agradezco a mi compañera de vida, Angelita la Abeja Almeida, mi complemento y mi fuerza para cada día luchar por lo que amo y por lo que sueño.

## **DEDICATORIA**

A mi Angely Nathaly Almeida  
Safadi y a Oliver Rafael  
Ayala Córdova.

Este trabajo es para ustedes.

## RESUMEN

En el presente trabajo de titulación se realizó la construcción de un modelo dinámico del sistema de generación de residuos sólidos urbanos asociados al aumento poblacional y otros factores de influencia para el cantón Rumiñahui. Se identificaron las variables de mayor importancia para el sistema y se identificaron las relaciones de influencia entre las mismas. Se encontró que la generación de residuos sólidos urbanos está principalmente determinada en función del Producto Interno Bruto, el crecimiento poblacional y la cantidad de residuos reciclados. Se realizó una simulación de 3 escenarios en un plazo de 8 años (2013-2021): El primero modelando el sistema en base a predicciones del PIB para el año 2020; el segundo escenario contemplando una variación del Producto Interno Bruto acorde con la situación económica actual debido a la crisis sanitaria del COVID-19; finalmente, un escenario donde exista un crecimiento significativo en la fracción de residuos reciclados que disminuya la generación de RSU durante el año 2020. El modelo fue validado comprando los datos de salida con datos reales de generación de RSU en el cantón Rumiñahui. Se observó la importancia del PIB como variable estrechamente relacionada a la generación de RSU y el modo en que una caída del mismo puede afectar al sistema de residuos sólidos. Se determinó que un incremento significativo en la tasa de reciclados puede tener una incidencia en la generación de residuos aún mayor a la que se obtuvo con una fuerte caída del PIB nacional.

## ABSTRACT

In the present titulation work, the construction of a dynamic model of the urban solid waste generation system associated with the population increase and other influencing factors for the Rumiñahui canton was carried out. The variables of greatest importance to the system were identified and also the relationships of influence between them. It was found that the generation of urban solid waste is mainly determined based on the Gross Domestic Product, population growth and the amount of recycled waste. A simulation of 3 scenarios was carried out over a period of 8 years (2013-2021): The first modeling the system based on GDP predictions for the year 2020; the second scenario contemplating a variation of the Gross Domestic Product in accordance with the current economic situation due to the COVID-19 health crisis; finally, a scenario where there is a significant growth in the fraction of recycled waste that reduces the generation of MSW during the year 2020. The model was validated by purchasing the output data with real data on the generation of MSW in the Rumiñahui canton. The importance of GDP as a variable closely related to the generation of MSW and the way in which a fall in it can affect the solid waste system were observed. It was determined that a significant increase in the recycling rate may have an impact on the generation of waste even greater than that obtained with a sharp drop in national GDP.

## ÍNDICE

1. CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Antecedentes .....	1
1.2 Justificación de la investigación .....	2
1.3 Alcance.....	4
1.4 Objetivos .....	4
1.4.1 Objetivo General.....	4
1.4.2 Objetivos específicos .....	4
2. CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Sistemas y modelos .....	5
2.1.1. Definiciones .....	5
2.1.2. Elementos constitutivos .....	5
2.1.3 Determinación de variables de estado.....	6
2.1.4 Dinámica de sistemas.....	7
2.2 El sistema de generación y manejo de residuos sólidos urbanos .....	8
2.2.1 Tipología de los residuos sólidos.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.2.2. Variables que influyen en la generación de los residuos sólidos urbanos .....	9
2.2.3 Composición de los residuos sólidos urbanos .....	11
2.2.4 Recolección y disposición final de los residuos sólidos urbanos .....	12
2.3. Marco normativo sobre la generación y el manejo de los residuos sólidos urbanos.....	13
2.3.1. Legislación nacional sobre la generación y el manejo de los residuos sólidos.....	13
2.3.2 Marco de competencias a nivel territorial.....	15
2.4. Generación y manejo de los residuos sólidos urbanos del cantón Rumiñahui .....	17

2.4.1. Descripción del cantón .....	17
2.4.2. Composición de los residuos sólidos .....	17
2.4.3. Generación.....	18
2.4.4. Recolección y disposición final .....	18
<b>3. CAPÍTULO III. METODOLOGÍA.....</b>	<b>21</b>
3.1. Identificación de las variables de estudio.....	21
3.2. Discriminación de variables .....	22
3.3. Construcción del Diagrama Causal.....	24
3.4. Obtención de datos necesarios.....	25
3.5. Construcción del Diagrama Forrester .....	25
3.6. Ecuaciones utilizadas .....	25
3.6.1. Población .....	26
3.6.2. Fracción de reciclados .....	27
3.6.3. Producto Interno Bruto .....	28
3.6.4. Generación per cápita .....	30
3.6.5. Generación de residuos .....	32
3.6.6. Residuos reciclados .....	32
3.6.7. Generación final de residuos sólidos urbanos.....	32
3.6.8 Simulación del modelo .....	32
<b>4. CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>33</b>
4.1. Identificación de relaciones de influencia entre variables .....	33
4.1.1. Discriminación de variables .....	33
4.1.2. Diagrama Causal.....	36
4.2. Construcción de modelo dinámico de generación de RSU	38
4.2.1. Diagrama Forrester.....	38
4.2.2. Primer escenario.....	39
4.2.3 Segundo Escenario.....	41
4.2.4. Tercer Escenario .....	43
4.2.5. Comparación entre escenarios .....	45

4.3. Validación del modelo .....	46
5. CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	47
5.1 Conclusiones.....	47
5.2 Recomendaciones .....	49
6. REFERENCIAS.....	50

# 1. CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Antecedentes

La generación global de residuos sólidos ha aumentado considerablemente durante las últimas décadas, habiéndose generado para el año 2016 un aproximado de 2010 millones de toneladas a nivel mundial. Este incremento se considera un serio problema para la humanidad, ligado sobre todo al crecimiento poblacional, sus hábitos de consumo, la falta de una cultura de reciclaje y aprovechamiento de residuos, así como a la amplitud de la frontera urbana y la sobreexplotación de recursos (Kaza, Yao, Bhada-Tata, & Woerden, 2018). Todo esto desencadena un complejo desequilibrio que abarca graves afectaciones al medio ambiente, a la salud pública, al sector económico y social, ya que un manejo ineficaz de los residuos sólidos producidos tiene una incidencia directa en la contaminación de suelos, aguas, liberación de gases de efecto invernadero, desarrollo de medios de propagación de vectores y malos olores (Popli, Sudibya, & Kim, 2017).

La Dinámica de Sistemas es una metodología que permite evaluar políticas y comportamientos de sistemas complejos a mediano y largo plazo mediante el estudio de las variables y sus conexiones, lo cual que permite el análisis y resolución de problemas, a partir del uso de datos reales cuyos atributos se interrelacionan de forma causal (Ramírez Flórez, Giraldo Correa, Urrea, & Osorio Gómez, 2017). Su primera aplicación en el ámbito ambiental se dio a finales de los años sesenta, a cargo de la asociación privada denominada el Club de Roma, cuyos investigadores realizaron proyecciones de la población, recursos disponibles y contaminación en el planeta. Este primer modelaje tuvo una gran incidencia en la opinión pública y la comunidad científica, siendo objeto de múltiples debates, por lo cual existió una gran difusión de la Dinámica de Sistemas (Ibarra Vega & Redondo, 2015). En las últimas décadas se ha presentado un notable desarrollo en su aplicación en la resolución de problemas ambientales y de sostenibilidad.

En el ámbito relacionado a los residuos sólidos, se han desarrollado varias investigaciones generando modelos que aplican la Dinámica de Sistemas. Dyson y Chang (2005) lograron predecir la cantidad de generación de residuos sólidos en la ciudad de San Antonio, en Texas, la cual es una de las zonas urbanas de más rápido crecimiento en los Estados Unidos. Al-Khatib, Eleyan, & Garfield (2015) siguieron esta metodología para predecir la cantidad de desechos médicos generados en un área de amplio desarrollo urbano, basándose en un conjunto de muestras tomadas de hospitales del distrito de Jenin, en Palestina. Un estudio se centró en la crisis de manejo de residuos que afectaba a la ciudad de Campania, Italia, el cual permitió evaluar el comportamiento de diversas opciones de tratamiento disponibles y proporcionó un marco analítico para explorar los efectos de políticas alternativas de gestión de residuos (Di Nola, Escapa, & Ansah, 2018). En cuanto a Latinoamérica, destaca el estudio realizado por Redondo y Solano (2010), donde se aplicó la Dinámica de Sistemas para entender la incidencia de la población sobre la generación de residuos y la calidad ambiental en Colombia. A su vez se realizó un estudio evaluando el impacto de un sistema de gestión de residuos sólidos asociados al aumento de la población en la ciudad de Cali, cuyas conclusiones sugieren la formación de nuevas políticas que se adecúen a la necesidad real del sistema (Ávila, Nieto, Jiménez, & Osorio, 2011). En el mismo ámbito, Vega (2019) analizó los efectos de la gestión del sistema de residuos sólidos en la ciudad de Chimote, Perú, donde se propusieron políticas de cambio en la estructura del modelo sistémico actual. Simonetto, Modro, y Dalmolin (2013) evaluaron el comportamiento de los residuos generados en Brasil, el efecto del reciclaje y su impacto en la política energética, soportando procesos de toma de decisiones en estos aspectos.

## **1.2 Justificación de la investigación**

La producción de residuos sólidos urbanos es una consecuencia directa de las actividades humanas, los cuales pueden provenir de una gran variedad de

fuentes y clasificarse de acuerdo a su composición. Debido al uso indiscriminado de productos desechables y los hábitos de consumo de la población, en los últimos años se ha notado un incremento constante de la cantidad de residuos generados (Toro, Szantó, Pacheco, Contreras, & Gálvez, 2016). A esto se suma una casi completa falta de conciencia ambiental, y la carencia de una cultura de separación de residuos y reciclaje. El aumento constante en la generación de residuos sólidos puede desencadenar un desequilibrio en la gestión de los mismos, lo cual se asocia a diversos impactos ambientales como la contaminación del agua, el suelo y el aire (Ávila et al., 2011). El gran volumen de residuos generados sumado a la tendencia a su incremento progresivo constituyen un entorno preocupante debido a la complejidad del sistema que involucra, a la cantidad de recursos necesarios para su gestión y al creciente espacio y gran presupuesto que requieren su tratamiento y su disposición final.(Schejtman & Irurita, 2010). La capacidad de almacenamiento de los rellenos sanitarios donde se acumulan diariamente los residuos es limitada, y la construcción permanente de nuevos cubetos para abarcar el volumen necesario de basura no es una opción viable para la salud del ecosistema (Rivera, 2011). El relleno sanitario El Inga es el sitio de disposición final de los residuos del Distrito Metropolitano de Quito, además de todos los residuos sólidos recolectados en el Cantón Rumiñahui y de gestores privados autorizados, el cual recibe aproximadamente 2200 toneladas de residuos sólidos al día. El último cubeto construido entró en funcionamiento en mayo del 2019 y se considera que tiene 18 meses de vida útil, por lo cual será necesaria la construcción de un nuevo cubeto para la disposición final de los residuos desde inicios del año 2021(EMGIRS, 2019). Esto implica que, si no se generan cambios que busquen solucionar las deficiencias del sistema de gestión de los residuos sólidos, se estará comprometiendo la salud del ambiente, así como la pérdida de recursos y presupuesto. Al tratarse de un sistema complejo, la generación de residuos se ve influida por una gran cantidad de variables interrelacionadas entre sí, lo cual dificulta la comprensión de todos los procesos que devienen en el mismo. La falta de aplicación de metodologías que involucren un enfoque de dinámica de sistemas para tratar problemas como este puede afectar el entendimiento global

de la situación actual, y llevar a una mala toma de decisiones por parte de entidades administrativas.

### **1.3 Alcance**

En este estudio se identificaron las variables que inciden en la generación de residuos sólidos así como las relaciones de influencia que existen entre las mismas. Se realizó una discriminación de variables que influyen en el sistema utilizando el software PROPOWIN. Para la recopilación de datos y su debido procesamiento se trabajó exclusivamente con información secundaria generada por instituciones competentes, como son el Municipio de Rumiñahui, INEC, Rumiñahui- ASEO EP, EMGIRS, Banco Central del Ecuador. A partir de ello se diseñó un modelo dinámico del sistema de generación de residuos sólidos para el cantón Rumiñahui mediante el uso del software Vensim. Posteriormente se valoraron los resultados obtenidos mediante la simulación del sistema.

### **1.4 Objetivos**

#### **1.4.1 Objetivo General**

Elaborar un modelo dinámico para el sistema de generación de residuos sólidos asociados al aumento poblacional y otros factores de influencia, aplicado al cantón Rumiñahui

#### **1.4.2 Objetivos específicos**

- Identificar las relaciones de influencia entre las variables que inciden en la generación de residuos sólidos

- Construir y valorar un modelo dinámico del sistema de generación de residuos sólidos para el cantón Rumiñahui.

## **2. CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Sistemas y modelos**

#### **2.1.1. Definiciones**

Según Cova, Regional, & Rioja (2016), un sistema es un conjunto de elementos que interactúan entre sí y con su entorno de acuerdo a ciertas reglas o principios. El sistema queda determinado por la naturaleza de sus elementos componentes, por las interacciones entre ellos y por su frontera, es decir por las relaciones de pertenencia que separan al sistema del ambiente en que se encuentra inmerso. Los sistemas pueden ser tipificados en naturales o artificiales, materiales o abstractos; abiertos, cerrados o aislados; estáticos o dinámicos; por su parte cada disciplina define los sistemas que en particular estudia e investiga (sociales, biológicos, de procesamiento de datos, organizativos, termoeléctricos, etc.)

El estudio directo de los fenómenos reales de un sistema presenta dificultades debido a su complejidad, a sus múltiples interacciones, y a la imposibilidad de realizar algunas medidas, observaciones, controles, etc. La forma general de abordar cualquier fenómeno real es asociarlo a una representación conceptual; a ésta es a la que se denomina modelo. Un modelo es una simplificación de la realidad, en donde se recogen aquellos aspectos de gran importancia y se omiten los que no tienen relevancia para los objetivos buscados. Generar un modelo, y utilizarlo con criterio implica la comprensión del sistema que representan (Beatriz & Rodríguez, 2011).

#### **2.1.2. Elementos constitutivos**

Los elementos que componen y configuran un sistema se encuentran siempre dentro de sus límites, y pueden definirse de la siguiente manera según (Ferrerías & Gay, 2016; Navia Estrada, 2011):

**Elementos:** Los elementos son los componentes de un sistema. Estos pueden ser representación o conceptualización de características de la realidad y pueden a su vez ser sistemas (subsistemas).

**Proceso de conversión:** Dentro de un sistema tienen lugar procesos de conversión que cambian las características de los elementos de entrada convirtiéndolos en elementos de salida.

**Entradas:** Constituyen los flujos que ingresan al sistema y que proceden de fuera de éste. Las entradas pueden ser modificables o inmodificables, dependiendo del tipo de elemento que involucre.

**Salidas:** Son los flujos o productos que salen del sistema hacia el medio ambiente o exterior del mismo.

**Interacción entre componentes:** : Las interacciones entre los componentes de un sistema pueden ser de diferentes formas, dependiendo de la relación existente entre éstos: directas, cíclicas y de competencia. La interacción directa se da cuando la entrada de un componente da como resultado la salida de otro componente del sistema y suele llamarse interacción de una sola vía. La interacción cíclica o de doble vía, es cuando hay retroalimentación entre los componentes. La interacción de competencia es cuando dos componentes compiten por una misma entrada. En un mismo sistema puede presentarse todos los tipos de interacción, por lo que es importante saber establecerlas correctamente.

**Límites del sistema:** Son aquellos que ubican o definen un sistema cualquiera. Estos buscan identificar lo que queda dentro y fuera del sistema para permitir su estudio o análisis.

### **2.1.3 Determinación de variables de estado**

Las variables de estado son aquellas que forman el conjunto más pequeño de variables que determinan el estado de un sistema dinámico. Para realizar la construcción de un modelo dinámico es importante determinar y definir las variables principales que influyen en el sistema, de modo que el mismo se construya acorde a parámetros reales. Determinar las variables de estado es el

primer paso para la construcción del modelo y a partir de ellas se pueden definir las ecuaciones que constituyen sus relaciones dentro de la dinámica del sistema.

#### **2.1.4 Dinámica de sistemas**

La Dinámica de Sistemas es una metodología que permite evaluar políticas y comportamientos de sistemas complejos a mediano y largo plazo mediante el estudio de las variables y sus conexiones, lo cual que permite el análisis y resolución de problemas, a partir del uso de datos reales cuyos atributos se interrelacionan de forma causal (Ramírez Flórez et al., 2017). La dinámica de sistemas trabaja sobre modelos dinámicos, es decir, aquel en el cual las distintas variables que podemos asociar a sus partes sufren cambios a lo largo del tiempo, como consecuencia de las interacciones que se producen entre ellas. Las herramientas que aporta la dinámica de sistemas, desde los diagramas de influencia hasta los modelos informáticos, permiten ver los sistemas que están en nuestro entorno mediante una óptica diferente que descubrirá aspectos que de otro modo no podrían ser observados a simple vista, mediante lo cual es posible alcanzar una visión más rica de la realidad (Donado, Canto, & Morilla, 2005).

Para realizar un modelo dinámico de sistemas se debe construir un Diagrama Forrester, el cual permite analizar el comportamiento del sistema y realizar la simulación del modelo. Este diagrama permite la escritura de las ecuaciones en el software para así poder validar el modelo, observar la evolución temporal de las variables y hacer análisis de sensibilidad (García, 2019)

Las variables que conforman el Diagrama Forrester, según Forrester (2000) pueden ser las siguientes:

**Variables de Nivel:** Son aquellas variables cuya evolución es significativa para el estudio del sistema y son equivalentes a las variables de estado de un sistema en descripción interna. Físicamente se definen como magnitudes que acumulan los resultados de acciones tomadas en el pasado, como ocurre en los niveles de los depósitos de la analogía hidrodinámica que acumulan líquido resultado de la apertura de las válvulas. De ahí el nombre de variable de nivel. Una característica

común a las variables de nivel es que cambian lentamente en respuesta a las variaciones de otras variables, en concreto de las variables de flujo.

**Variables de flujo** Son aquellas variables que determinan las variaciones en las variables de nivel del sistema y caracterizan las acciones que se toman en el sistema las cuales quedan acumuladas en los niveles correspondientes. Físicamente expresan como se convierte la información disponible del sistema en una acción y están asociadas a las válvulas de la analogía hidro

**Variables auxiliares** Las variables auxiliares representan pasos en los que se descompone el cálculo de una variable de flujo a partir de los valores tomados por los niveles. El propósito del uso de las variables auxiliares está en facilitar la comprensión y definición de las variables de flujo ya que las variables auxiliares suelen representar en si mismas conceptos individuales.

## **2.2 El sistema de generación y manejo de residuos sólidos urbanos**

### **2.2.1 Tipología de los residuos sólidos**

Los residuos sólidos pueden clasificarse según el lugar o el área de actividad de donde provienen (Veritas, 2008)

1. **Municipales:** son residuos producidos dentro del perímetro urbano, tomando en cuenta desechos del tipo domésticos, comerciales, oficinas y servicios, que a su vez se pueden clasificar en:
  - Ordinarios
  - Voluminosos
  - Especiales
  
2. **Sanitarios:** se consideran a todos aquellos residuos que son procedentes de actividades relacionadas con el aseo, así como de laboratorios clínicos, centros de salud o de investigación.

3. **Construcción o demolición:** se consideran a todos aquellos residuos que son provenientes de obras civiles, como son; la construcción, rehabilitación, ampliación y demolición.
4. **Industriales:** se consideran en esta categoría, a todos aquellos residuos que son el resultado de actividades de producción industrial, explotación y manufactura, los los cuales pueden ser diferenciados entre:
  - Inertes
  - No peligrosos
  - Peligrosos
5. **Agrícolas, ganaderos y forestales:** este tipo de residuos son provenientes de actividades relacionadas con la producción agrícola, ganadera, pecuaria o forestal, teniendo en cuenta también aquellos generados por industrias alimenticias como, por ejemplo; mataderos, empresas de lácteos, harineras y tabacaleras.
6. **Mineros:** son aquellos residuos generados debido a la explotación de recursos mineros, en el cual se incluyen todos los procesos de esta industria. Dichos residuos pueden ser de carácter líquido o sólido.
7. **Radiactivos:** son residuos derivados principalmente de la medicina, industria e investigación, así como centrales de energía nuclear.
8. **Lodos activados:** son aquellos residuos generados a partir de procesos de tratamiento de aguas.

### **2.2.2. Variables que influyen en la generación de los residuos sólidos urbanos**

Existe una amplia cantidad de variables que influyen directa o indirectamente en la generación de los residuos sólidos urbanos, sin embargo, solo un grupo imprescindible de ellas poseen una influencia significativa sobre el sistema debido a su forma de interrelacionarse. Estas variables principales son:

**Generación total de residuos sólidos urbanos:** Se trata de la variable principal del sistema de generación de RSU y depende directamente de la población y la generación per cápita.

**Población:** La población y su variación a través del tiempo son un factor clave en el sistema, y a su vez depende de las tasas de mortalidad, natalidad e inmigración limitadas a la zona del sistema. Altas poblaciones con bajas tasas de mortalidad y altas tasas de natalidad e inmigración desembocan en mayores cantidades de generación de residuos sólidos (Redondo & Solano, 2010).

**Generación per cápita:** Es la cantidad promedio de residuos sólidos generados por cada habitante de una población en un día, expresada en Kilos (Toro et al., 2016). Esta variable se ve afectada por diversos factores que, a diferencia de la población, sí pueden ser modificados por acciones humanas, lo cual aumenta su importancia dentro del sistema.

**Residuos reciclados:** Son el porcentaje de residuos que han sido separados para volverlos a introducir dentro de un ciclo productivo. Un alto porcentaje de residuos reciclados dará lugar a una reducción significativa de peso y volumen en la generación per cápita (Toro et al., 2016). A su vez, depende de otros factores como el porcentaje de separación en la fuente, la educación de la población y sus hábitos de consumo.

**Producto interno bruto:** Según Semarnat (2016), en las últimas décadas se ha notado que la cantidad total de residuos generados ha ido en incremento junto con el crecimiento del PIB. Esto se debe a que cuanto mayor sea el PIB, aumenta la oferta y demanda del comercio, lo cual se traduce en un aumento en la capacidad de consumo de los habitantes.

**Hábitos de consumo:** Los hábitos de consumo de la población influyen significativamente sobre la cantidad de residuos generados dentro del sistema. Una sociedad cuyos hábitos de consumo impliquen la compra excesiva de productos tendrá una mayor generación per cápita de residuos sólidos.

**Educación:** La educación de la población juega un papel importante en el sistema de generación de residuos sólidos. Una sociedad educada en

separación y aprovechamiento de residuos generará una menor cantidad de desechos y una mayor cantidad de energía útil (Ulli-Beer, Andersen, & Richardson, 2007)

**Normativa:** La aplicación de normativa a la gestión de residuos sólidos es fundamental, sobre todo para lograr una buena cobertura de recolección y un aumento constante en la tasa de reciclaje (Lakhan, 2016)

### **2.2.3 Composición de los residuos sólidos urbanos**

Los residuos sólidos urbanos están compuestos de los siguientes materiales:

- Vidrio: Son los envases de cristal, frascos, botellas, etc.
- Papel y cartón: Periódicos, revistas, restos de embalaje, envases de papel, cartón, etc.
- Orgánicos: Son los restos de alimentos y de jardinería. Constituyen la fracción mayoritaria en el conjunto de los residuos urbanos.
- Plásticos: Envases, fundas, tapas, botellas, juguetes, etc.
- Textiles: Ropas y vestidos y elementos decorativos del hogar.
- Metales: Latas, restos de herramientas, utensilios de cocina, mobiliario etc.
- Madera: Restos de muebles, pallets, etc.

A todo esto, hay que añadir la fracción de residuos producidos en los domicilios, pero que por su toxicidad tienen la consideración de residuos peligrosos y que se tratan aparte:

- Aceites minerales. Procedentes de los vehículos ciudadanos.
- Baterías de vehículos.
- Residuos de material electrónico: Teléfonos móviles, ordenadores, etc.
- Electrodomésticos.
- Medicamentos.
- Pilas.
- Productos químicos en forma de barnices, colas, disolventes, ceras, etc.

- Termómetros.
- Lámparas fluorescentes y bombillas de bajo consumo.

#### **2.2.4 Recolección y disposición final de los residuos sólidos urbanos**

El servicio de recolección y transporte de residuos ha sido históricamente priorizado por los municipios de América Latina y el Caribe sobre el resto de los servicios de manejo de residuos sólidos. La visibilidad social del accionar municipal, el rechazo popular a la acumulación de los residuos en la puerta de sus casas y los peligrosos efectos sobre la salud de la población son aspectos que influyen en gran medida para que así sea. El crecimiento poblacional urbano registrado durante los últimos años y el incremento consiguiente de la densidad poblacional han influido en la gradual modificación de las formas de provisión del servicio. En muchas ciudades de tamaño grande de la región, la colocación transitoria o presentación de los residuos en aceras o pequeñas canastillas elevadas en las puertas de los domicilios para su recolección ha sido sustituida progresivamente por la utilización de grandes contenedores ubicados en puntos estratégicos, a intervalos de espacio lo suficientemente pequeños como para permitir a la población acercarse para depositar sus residuos. Lo anterior ha influido en el creciente uso de equipo recolector rodante equipado con izadores, mecánicos o hidráulicos, de contenedores de carga trasera o lateral (Tello, Martínez, Daza, Soulier, & Terraza, 2011).

En el Ecuador la prestación del servicio público de manejo de desechos sólidos es una competencia exclusiva de los gobiernos autónomos descentralizados municipales tal como lo establece la Constitución y el Cootad. La gestión se apoya en los lineamientos emitidos por el Ministerio del Ambiente como Autoridad Ambiental Nacional.

En lo que respecta a la disposición adecuada de desechos sólidos, el 43% de GAD que corresponde a 96 municipalidades dispusieron los residuos sólidos en rellenos sanitarios; el 36% correspondiente a 79 GAD Municipales lo hicieron en botaderos; y, el 21% que corresponde a 46 GAD Municipales dispusieron los residuos sólidos en celdas emergentes; recolectándose en promedio 12.897,98

toneladas diarias de las cuales 11.641,94 que representan el 90,3% se recolectaron de manera no diferenciada y 1.256,04 que representa el 9,7% se recolectaron de forma diferenciada. En el Ecuador existen 72 rellenos sanitarios, de esos 45 poseen licencia ambiental, 11 no la poseen y 16 están en trámite según los Registros de Información Ambiental Económica.

### **2.3. Marco normativo sobre la generación y el manejo de los residuos sólidos urbanos**

#### **2.3.1. Legislación nacional sobre la generación y el manejo de los residuos sólidos**

La Constitución de la República del Ecuador reconoce el derecho de la población a “vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado [...] Se declara de interés público la preservación del ambiente, la conservación de los ecosistemas, la biodiversidad y la integridad del patrimonio genético del país, la prevención del daño ambiental y la recuperación de los espacios naturales degradados”.

El mismo marco constitucional en su artículo 264 establece como competencia exclusiva de los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales la prestación de los servicios públicos de agua potable, alcantarillado, depuración de aguas residuales, manejo de desechos sólidos y actividades de saneamiento ambiental.

El Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización – Cootad, en su artículo 55 establece las competencias exclusivas de los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales; siendo la de interés en nuestro tema:

“ d) Prestar los servicios públicos de agua potable, alcantarillado, depuración de aguas residuales, manejo de desechos sólidos, actividades de saneamiento ambiental y aquellos que establezca la ley;...”

En la misma línea, el Cootad en su artículo 137, en concordancia con la Constitución, señala que “Las competencias de prestación de servicios públicos de alcantarillado, depuración de aguas residuales, manejo de desechos sólidos, y actividades de saneamiento ambiental, en todas sus fases, las ejecutarán los

gobiernos autónomos descentralizados municipales con sus respectivas normativas...”

El novísimo Código Orgánico Ambiental (COA), en su artículo 23 designa al Ministerio del Ambiente como Autoridad Ambiental Nacional atribuyéndole la rectoría, planificación, regulación y coordinación del Sistema Nacional Descentralizado de Gestión Ambiental.

Es por ello que el COA determina, las políticas públicas generales de la gestión integral de los residuos, desechos y establece la obligatoriedad de su cumplimiento. Uno de los principios más importantes en su normativa, es la responsabilidad extendida de los productores sobre la gestión de residuos y desechos no peligrosos, peligrosos y especiales, además del fomento de la investigación, educación ambiental y el uso de las mejores tecnologías que minimicen impactos al ambiente y la salud humana.

Por otra parte, según los artículos 47 y 55 del Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente (TULSMA), declaran prioridad nacional y de interés público la gestión integral de los residuos sólidos no peligrosos en el país, esto implica una responsabilidad extendida y compartida por toda la sociedad para que contribuya al desarrollo sustentable a través de un conjunto de políticas intersectoriales nacionales en todos los ámbitos de gestión. De igual manera, en el artículo 57 del TULSMA, se establecen responsabilidades a los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales, para que garanticen el manejo integral de residuos y/o desechos sólidos generados en el área de su competencia, a continuación se presentan las siguientes.

- Elaborar e implementar un Plan Municipal de Gestión Integral de Residuos Sólidos en concordancia con las políticas nacionales y al Plan Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos
- Promover y fomentar la cultura de minimización de generación de residuos, separación en la fuente, recolección diferenciada, limpieza de los espacios públicos, y reciclaje.
- Reportar anualmente y llevar un registro de indicadores de técnicos, ambientales, sociales y financieros, de la prestación del servicio de la gestión

integral de residuos y/o desechos sólidos no peligrosos del cantón y reportarlos a la Autoridad Ambiental Nacional a través de los instrumentos que esta determine.

- Garantizar una adecuada disposición final de los residuos y/o desechos generados en el área de su competencia, en sitios con condiciones técnicamente adecuadas y que cuenten con la viabilidad técnica otorgada por la Autoridad Ambiental competente.
- Promover alianzas estratégicas para la conformación de mancomunidades con otros municipios para la gestión integral de los residuos sólidos, con el fin de minimizar los impactos ambientales.

### **2.3.2 Marco de competencias a nivel territorial**

Según la Ordenanza de Gestión Ambiental para el cantón de Rumiñahui (2009) se dictamina que:

Art. 3.- Es responsabilidad del Ilustre Municipio de Rumiñahui a través de su Dirección de Protección Ambiental y/o su delegado en coordinación con los gestores ambientales calificados, con las Instituciones Públicas y Privadas, y con la coparticipación de la ciudadanía; la recolección, transporte, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos domésticos, asimilables a domésticos, industriales y hospitalarios.

Art. 4.- Es obligación de las instituciones públicas y privadas, así como de la ciudadanía en general, la separación en la fuente de los residuos sólidos tanto orgánicos, inorgánicos, como materiales reciclables, previa su entrega a los vehículos recolectores en los horarios y frecuencias establecidas para cada sector del cantón.

En cuanto al Barrido y Recolección De Los Residuos Sólidos esta misma ordenanza dictamina en los artículos 7-9 que:

El barrido le corresponde a la Municipalidad a través de la Dirección de Protección Ambiental y/o su delegado con la coparticipación de todos los habitantes del cantón. Además, es obligación de los ocupantes de locales,

viviendas, almacenes, talleres, restaurantes, o negocios en general sacar los residuos sólidos, orgánicos e inorgánicos en la forma establecida en esta Ordenanza y de conformidad a los modelos de gestión que la municipalidad mande.

Para los habitantes del Cantón Rumiñahui, en el manejo de los residuos sólidos, el artículo 10 establece que ellos deben cumplir con las siguientes responsabilidades:

- Sacar y depositar los residuos sólidos, en los recipientes designados por la Municipalidad para su almacenamiento temporal hasta su recolección.
- Los negocios y establecimientos comerciales e industriales están obligados a mantener el área circundante, en un radio de diez metros, totalmente limpia.
- En los mercados y ferias, los comerciantes mantendrán limpios cada puesto de trabajo, y depositarán los residuos sólidos correctamente enfundados en los lugares establecidos por la municipalidad.
- Los propietarios y conductores de los vehículos de transporte masivo, en sus diferentes modalidades, dispondrán de un número necesario de recipientes con tapa, dentro de sus unidades, para el uso de los pasajeros.

En cuanto a la disposición final de Residuos ésta Ordenanza dictamina que:

Art. 11.- La disposición final de los residuos sólidos urbanos no peligrosos solo podrá efectuarse en rellenos sanitarios manejados técnicamente y con respeto al medio ambiente, en su defecto en los sitios que la Municipalidad disponga previo los estudios técnicos y económicos correspondientes. Al efecto se deberá contar con un Estudio de Impacto Ambiental aprobado y la correspondiente Licencia, previo a su instalación y funcionamiento y su control periódico a través de Auditorías Ambientales.

Art. 28.- Los desechos potencialmente infecciosos y especiales de los establecimientos de salud, que no hayan recibido tratamiento serán dispuestos en una celda de seguridad, la misma que debe cumplir con criterios técnicos y ambientales.

Art. 29.- La operación de la celda especial, será supervisada por el municipio en caso de que no esté operando directamente o por las autoridades sanitarias respectivas.

## 2.4. Generación y manejo de los residuos sólidos urbanos del cantón Rumiñahui

### 2.4.1. Descripción del cantón

El cantón Rumiñahui se ubica al sureste de la provincia de Pichincha, cerca de la ciudad de Quito, abarcando un territorio de 132,78 Km<sup>2</sup>. Su población es de aproximadamente 106548 habitantes.

### 2.4.2. Composición de los residuos sólidos

Tabla 1. Composición de residuos sólidos urbanos en el cantón Rumiñahui.

MATERIAL	COMPOSICIÓN	
	Área urbana	Área rural
Residuos orgánicos	66.71	35.5
Cartón	1.60	6.55
Papel periódico	1.51	
Papel bond y blanqueado	2.14	1.91
Papel de revista	1.36	2.84
Papel mezclado	-	-
Plástico PET (botellas)	1.28	3.05
Plástico PVC	2.67	-
Plástico rígido	4.23	-
Polietileno (fundas)	3.26	8.01
Otros plásticos (espuma flex)		3.63
Vidrio Verde	-	-
Vidrio transparente	1.03	2.34
Vidrio café	0.22	-
Chatarra	0.95	3.50
Telas y material textil	0.70	2.41
Pilas	-	-
Lámparas comunes	-	0.34
Lámparas ahorradoras	-	-
Envases tetra pack	0.69	-
Otros residuos peligrosos domésticos (pañales y toallas sanitarias)	8.11	15.53
Tierra	-	-
Otros tipos de residuos	3.57	14.39
<b>TOTAL</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>

Tomado de (Rumiñahui-Aseo EPM, 2017)

### 2.4.3. Generación

A través de los servicios de recolección contenerizada y a pie de vereda, se recogen los residuos sólidos domésticos y asimilables a domésticos que generan los habitantes del cantón. Hasta noviembre de 2011, se recolectaron 29406,52 toneladas de RSU en el cantón Rumiñahui, con un promedio de 2673,32 t/mes y 0,90 kg/día por habitante. Para 2018, el total de residuos recolectados ascendió a 44289,30 toneladas de RSU, con un promedio de 3.690,78 t/mes y una generación per cápita de 1,10 kg/hab en promedio. Estos datos demuestran que, anualmente, se ha incrementado la generación per cápita, como puede observarse en la siguiente tabla:

Tabla 2. Generación per cápita para el cantón Rumiñahui.

AÑOS	TOTAL ANUAL	PROMEDIO DIARIO	PROMEDIO MENSUAL	GENERACIÓN PER CÁPITA
2011	29.406,52 t	90,00 t	2.673,32 t	0,90 kg
2012	35.582,39 t	97,13 t	2.965,20 t	1,04 kg
2013	35.537,05 t	97,33 t	2961,42 t	1,05 kg
2014	38.258,23 t	104,79 t	3.188,19 t	1,06 kg
2015	38.280,21 t	104,79 t	3.190,02 t	1,07 kg
2016	39.673,38 t	108,38 t	3.306,12 t	1,04 kg
2017	42.908,19 t	117,51 t	3.575,68 t	1,10 kg
2018	44.289,30 t	121,32 t	3.690,78 t	1,10 kg

Tomado de (Rumiñahui - ASEO EPM., 2019)

### 2.4.4. Recolección y disposición final

Según la Actualización Del Plan De Gestión Integral De Residuos Sólidos Urbanos No Peligrosos Cantón Rumiñahui Período 2016-2019 (Rumiñahui-Aseo EPM, 2017):

La Empresa Pública Municipal de Residuos Sólidos Rumiñahui-Aseo, EPM, presta los servicios de recolección, barrido y transporte de residuos sólidos urbanos en el cantón Rumiñahui, cuyo destino final es el Relleno Sanitario del Distrito Metropolitano de Quito Por otro lado, y con la finalidad de cubrir con los servicios de recolección y transporte, la empresa RUMIÑAHUI-ASEO, EPM, mantiene un contrato suscrito con la empresa GLOBAL PARTS S.A., quien

realiza los: “Servicios de transporte y recolección de desechos sólidos domiciliarios contenerizada del cantón Rumiñahui”, (operadora privada).

En cuanto a los desechos hospitalarios, la Empresa Pública Municipal de Residuos Sólidos Rumiñahui-Aseo, EPM, realizó una actualización al PMA para la recolección de desechos hospitalarios en el cantón de Rumiñahui en el cual con oficio No. MAE-DPAPCH-2014-0980 de fecha 03 de septiembre de 2014, la DPAP del MAE aprueba el mencionado documento. Con este antecedente la Empresa Pública Municipal de Residuos Sólidos RumiñahuiAseo, EPM, mantiene un convenio con la empresa GADERE S.A., para brindar los servicios de recolección, transporte, almacenamiento temporal y disposición final de los desechos hospitalarios del cantón Rumiñahui.

El siguiente cuadro describe las actividades que desarrolla en forma directa cada uno de los involucrados en la gestión de residuos:

Tabla 3. Involucrados en la gestión de residuos del cantón Rumiñahui.



Tomado de (Rumiñahui-Aseo EPM, 2017).

En cuanto a las operaciones de servicio realizadas en el cantón constan las siguientes:

**Recolección contenerizada:** Se lleva a cabo mediante camiones compactadores de carga lateral equipados con un sistema de levanta contenedores. Los residuos son depositados en fundas cerradas dentro del contenedor utilizando el mecanismo para abrir y cerrar la tapa (pedal). Existen 902 contenedores distribuidos en el cantón. Este servicio se brinda los 365 días del año.

**Recolección tradicional:** La recolección tradicional de residuos sólidos en Rumiñahui, se realiza mediante camiones compactadores de carga posterior y se efectúa en las zonas urbanas y rurales del cantón, en las plazas y mercados y en las industrias. Con este sistema, se recolectan aproximadamente 400 toneladas al mes. Este servicio se brinda todo el año, de lunes a viernes en horarios alternados de lunes-miércoles-viernes, martes-jueves.

**Limpieza y recolección en eventos y espectáculos públicos:** Para obtener este servicio, las personas naturales o jurídicas responsables de eventos públicos cancelarán una tasa por el servicio de recolección y barrido para eventos públicos, por día de ocupación, según la tabla de precios vigente.

**Hidrolavado y limpieza de calles y plazas:** Este servicio se realiza con equipos hidráulicos, lavando y recogiendo los R/S en las plazas del Cantón. Se planifica y se ejecuta con una frecuencia definida según las necesidades y afluencia de público (ferias, eventos, reuniones, mítines).

**Recolección en industrias, mercados y centros comerciales:** Este servicio se brinda a las siguientes industrias: Enkador, Crylamit, Textiles San Pedro, Corporación La Favorita, FV, Avon, Sedemi, Lechera Andina, Rey Leche, Chaide y Chaide, entre otros. En este servicio se recolectan alrededor de 300 toneladas al mes.

**Recolección diferenciada de residuos sólidos:** Se lo realiza optimizando la diferenciación efectuada por el cliente, optimizando su disposición final. El servicio se presta de manera continua en el Centro de acopio de RS. EL resultado permite reducir la carga de residuos dispuestos en el relleno sanitario.

**Recolección de desechos sólidos hospitalarios:** La gestión integral de los residuos hospitalarios comprende: una Gestión Interna por parte de las entidades de salud, que va desde la generación de desechos infecciosos, clasificación en la fuente, recolección interna, almacenamiento temporal, para luego pasar a una Gestión Externa, la cual realiza la recolección y el transporte de los desechos infecciosos con un sistema integrado de vehículos especiales para su transporte, el tratamiento y disposición final de los mismos en el Relleno Sanitario del Distrito Metropolitano de Quito.

### **3. CAPÍTULO III. METODOLOGÍA**

#### **3.1. Identificación de las variables de estudio**

Se determinaron las variables principales que tienen mayor influencia en el sistema de generación de residuos sólidos en el cantón Rumiñahui a partir de revisión bibliográfica de otros estudios que involucren la dinámica de sistemas con enfoques similares. Al tratarse de un sistema complejo, el número inicial de variables que lo componen fue de 14. Sin embargo, se decidió llevar a cabo una discriminación de variables con el fin de reducir el sistema a sus variables principales cuyos datos se encuentren disponibles para su aplicación.

Las variables que conforman el sistema de generación de residuos sólidos urbanos identificadas inicialmente fueron:

- Natalidad
- Mortalidad
- Población
- Tasa de inmigración
- Generación final de residuos
- Fracción de reciclados
- Producción per cápita
- Zonas climáticas
- Zonas turísticas

- Hábitos de consumo
- Porcentaje de separación en la fuente
- Producto interno bruto
- Normativa
- Educación de la población

### 3.2. Discriminación de variables

Se realizó la discriminación de variables utilizando el software PROPONE, el cual permite valorar cada variable comparando su importancia frente al resto. Se siguieron los siguientes pasos:

- 1) Se eliminaron del análisis las variables dependientes: Generación final de residuos, Población, Generación per cápita, Fracción de reciclados.
- 2) Para cada variable dependiente se seleccionaron aquellas que tienen influencia directa sobre la misma.
- 3) Se realizó una calificación comparativa de las variables utilizando la escala de Saaty:

Tabla 4. Escala de Saaty.

VALOR	DEFINICIÓN	COMENTARIOS
1	Igual importancia	El criterio A es igual de importante que el criterio B
3	Importancia moderada	La experiencia y el juicio favorecen ligeramente al criterio A sobre el B
5	Importancia grande	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente el criterio A sobre el B
7	Importancia muy grande	El criterio A es mucho más importante que el B
9	Importancia extrema	La mayor importancia del criterio A sobre el B está fuera de toda duda
2,4,6 y 8	Valores intermedios entre los anteriores, cuando es necesario matizar	

Tomado de (Maruyama, 2008)

El valor seleccionado para cada variable se lo dio en función de su importancia en el sistema a partir de revisión bibliográfica de distintas fuentes, y también se tomó en cuenta la disponibilidad de información de cada una de ellas.

Tabla 5. Valores asignados a variables que influyen en la Generación per cápita según escala de Saaty.

<b>Generación per cápita</b>	<b>Valor</b>
PIB	1
Normativa	5
Educación	4
Zona climática	9
Zona turística	9
Estaciones del año	8
Hábitos de consumo	4

Tabla 6. Valores asignados a variables que influyen en la Población según escala de Saaty.

<b>Población</b>	<b>Calificación de variables</b>
Mortalidad	1
Natalidad	1/3
Migración	5

Tabla 7. Valores asignados a variables que influyen en la Fracción de reciclados según escala de Saaty.

<b>Fracción de reciclados</b>	<b>Calificación de variables</b>
Educación	1
Normativa	2
% Separación en la Fuente	3
Hábitos de consumo	3

- 4) Se realizó la comparación manual entre la primera variable y el resto, mientras que el programa realizó las comparaciones siguientes de forma

automática y se obtuvo un ranking entre 0 y 1, siendo los valores más cercanos a 1 los más influyentes para la variable dependiente.

- 5) Se eligieron las variables de estudio con mayor ranking obtenido para la realización del Diagrama Causal.

### **3.3. Construcción del Diagrama Causal**

Para establecer el modelo se llevó a cabo la construcción de un Diagrama Causal, el cual representa gráficamente los elementos que influyen en el problema a tratar y las relaciones existentes entre ellos. El Diagrama Causal construido a partir de las variables y datos procesados para el sistema de generación de residuos sólidos en el cantón Rumiñahui permitió identificar la retroalimentación necesaria para dar estabilidad al sistema y también aquellos factores que pueden constituirse como ejes de cambio que permitirán transformarlo hacia una forma más eficiente y con menor problemática (ATC-Innova, 2020). Una vez construido el Diagrama, se especificaron las relaciones de influencia entre cada variable, de modo que el sistema sea representado en el Diagrama de la forma más fiel posible a la realidad.

Se utilizó el software Vensim para la construcción del modelo, el cuál se ha elegido debido a que es un software libre de fácil manejo que es ampliamente utilizado en la Dinámica de Sistemas.

El Diagrama Causal es en general un paso previo a la construcción de un Diagrama de Forrester, el cual sirve para simular el modelo en el software, permitiendo analizar el comportamiento del sistema, y realizar la simulación de distintos escenarios, de forma que los resultados que muestra el modelo ayuden a resolver mejor el problema que analiza.

Las variables seleccionadas para construir el Diagrama Causal fueron: tasa de crecimiento, residuos reciclados, educación de la población, políticas públicas, producto interno bruto, población, generación per cápita, generación total de residuos sólidos urbanos.

### **3.4. Obtención de datos necesarios**

Se llevó a cabo una recopilación de información secundaria de acceso público generada por entidades competentes, como son el Municipio de Rumiñahui, Municipio de Distrito Metropolitano de Quito, Ministerio del Ambiente, INEC, EMGIRS, Rumiñahui ASEO EP, Banco Central del Ecuador. Se recolectaron datos referentes a las distintas variables identificadas para la realidad del Cantón Rumiñahui. Aquellas variables para las cuales no fue posible obtener datos cuantificables ni series temporales aplicables al modelo no fueron tomadas en cuenta para la construcción del Diagrama Forrester y la posterior simulación del sistema.

### **3.5. Construcción del Diagrama Forrester**

Posteriormente se llevó a cabo la construcción del Diagrama Forrester, el cual permitió analizar el comportamiento del sistema y realizar la simulación del modelo. El Diagrama Forrester es una traducción del Diagrama Causal a una terminología que permite la escritura de las ecuaciones en el software para así poder validar el modelo, observar la evolución temporal de las variables y hacer análisis de sensibilidad (García, 2019). Se evaluaron tres escenarios en un plazo de 8 años; el primero simulando el sistema tal cual se ha construido el modelo, con un valor del Producto Interno Bruto según esta previsto para el año 2020; el segundo escenario simuló el mismo modelo con una variación del Producto Interno Bruto acorde con la situación económica actual debido a la crisis sanitaria del COVID-19; finalmente un escenario en donde se evidenció un crecimiento significativo en la fracción de residuos reciclados que disminuya la generación de RSU durante el año 2020.

### **3.6. Ecuaciones utilizadas**

### 3.6.1. Población

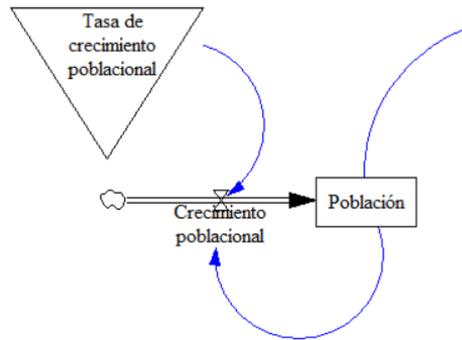


Figura 4. Diagrama de crecimiento poblacional.

Para determinar la Población y su variación, se partió de la siguiente ecuación:

Ecuación 1:

$$\text{Crecimiento poblacional} = \text{Población} * \text{Tasa de crecimiento poblacional} / (100)$$

A partir del crecimiento poblacional se llevó a cabo una integral de Euler de la siguiente manera:

Ecuación 2:

$$P = \text{INTEG}(CP, P0)$$

Donde:

P= Población

CP= Crecimiento Poblacional

P0= Población inicial

La población inicial en el año 2013 para el cantón Rumiñahui fue de 99518 habitantes y la tasa de crecimiento poblacional fue 3.33 % anual (INEC, 2010).

### 3.6.2. Fracción de reciclados

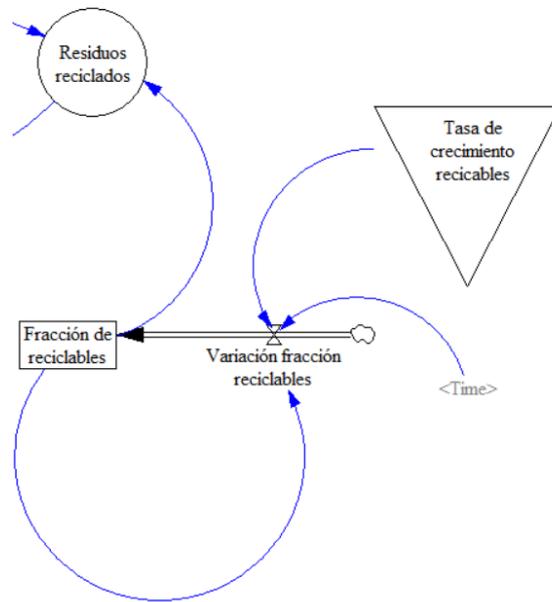


Figura 5. Diagrama de Residuos reciclados

Para determinar la Fracción de reciclables se partió de la siguiente ecuación:

Ecuación 3:

$$\text{Variación en Fracción de Reciclables} =$$

$$\text{Tasa de crecimiento reciclables (Tiempo)} * \text{Fracción de reciclables}$$

A partir de la Variación en Fracción de reciclables se prosiguió con la integral de Euler:

Ecuación 4:

$$R = \text{INTEG}(VR, R0)$$

Donde:

R= Fracción de reciclables

VR= Variación en Fracción de reciclables

R0= Fracción inicial de reciclables

La fracción inicial de reciclados utilizada fue de 0.097718, valor que corresponde al año 2016, desde el cual se empezó a contar la fracción de residuos reciclados en el Cantón Rumiñahui (Rumiñahui - ASEO EPM, 2020) .

Los tres escenarios comparten las mismas tasas de crecimiento de reciclados hasta el año 2019:

Tabla 8. Tasa de crecimiento de residuos reciclados

Año	Tasa de crecimiento
2016	0.097
2017	-0.123
2018	0.265
2019	0.079

Tomado de (Rumiñahui - ASEO EPM, 2020)

Cada escenario tiene un valor distinto para el año 2020, del siguiente modo:

Primer escenario: 0.079

Segundo escenario: -0.15

Tercer escenario: 0.8

### 3.6.3. Producto Interno Bruto

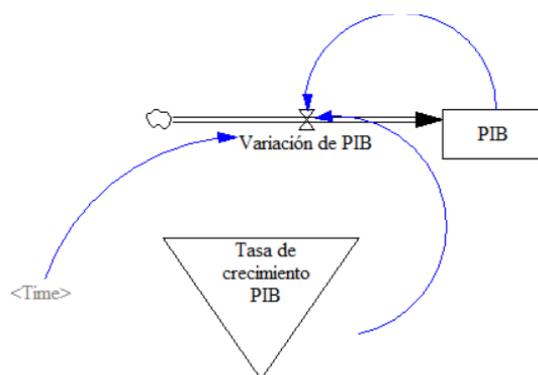


Figura 6. Diagrama de PIB

Para el cálculo de del PIB se partió de la siguiente ecuación:

Ecuación 5:

$$\text{Variación del PIB} = \text{Tasa de crecimiento PIB(Tiempo)} * \text{PIB}$$

A partir de la Variación del PIB se calculó el PIB con una integral de Euler

Ecuación 6:

$$\text{PIB} = \text{INTEG}(\text{VPIB}, \text{PIB}_0)$$

Donde:

PIB= Producto Interno Bruto

VPIB= Variación del PIB

PIB<sub>0</sub>= PIB inicial

Los tres escenarios comparten las mismas tasas de variación de PIB hasta el año 2019

Tabla 9. Variación de PIB

4. Fecha	Var. PIB (%)
2019	0.1
2018	1.3
2017	2.4
2016	-1.2
2015	0.1
2014	3.8
2013	4.9

Los valores de variación del PIB en el año 2020 corresponden a lo siguiente:

Primer escenario: 0.007

Segundo escenario: -0.06

Tercer escenario: -0.06

### 3.6.4. Generación per cápita

Para determinar la fórmula que relacione la generación per cápita y el PIB se realizó una regresión lineal entre las variables utilizando el software Excel. Se utilizaron los datos de generación per cápita obtenidos del Informe de gestión de residuos sólidos del cantón Rumiñahui (Rumiñahui - ASEO EPM., 2019), cotejándolos con los datos de PIB calculados por el software Vensim.

Las hipótesis consideradas fueron las siguientes:

Hipótesis nula: Existe correlación entre PIB y GPC

Hipótesis alternativa: No existe correlación entre PIB y GPC

Tabla 10. Producto interno bruto y GPC

Año	PIB (\$)	GPC Kg/hab año
2013	2213390080	357.0359554
2014	2297498880	372.0455627
2015	2320244224	360.2343211
2016	2292401408	365.9719353
2017	2349711360	413.9491264
2018	2380257536	381.3870507

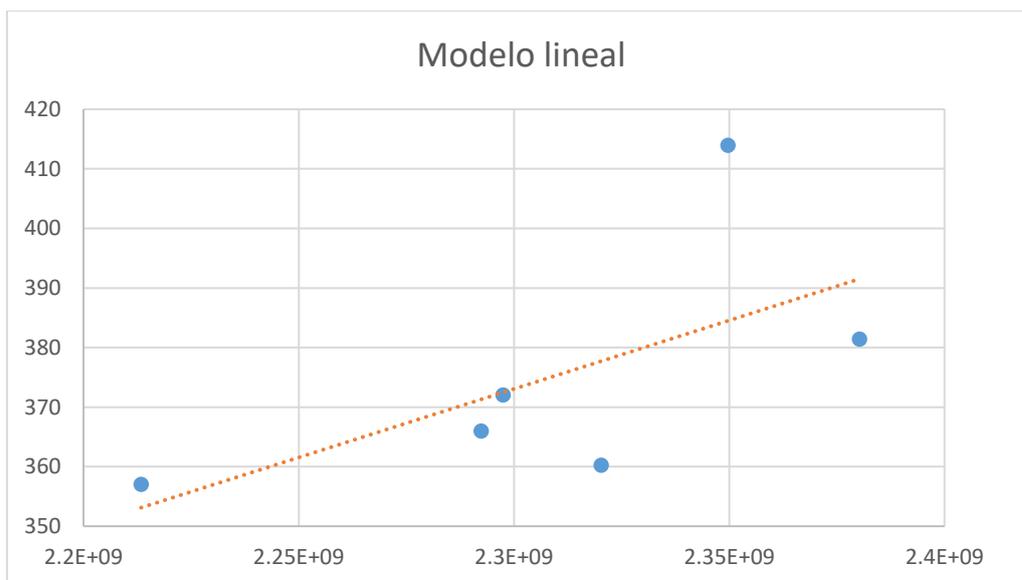


Figura 7. Regresión lineal entre PIB y GPC

Ecuación 7:

$$y = 2E - 07x - 156.2$$

Tabla 11. Estadísticas de la regresión lineal

<b>Estadísticas de la regresión</b>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.630082394
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.397003823
R <sup>2</sup> ajustado	0.246254779
Error típico	18.16450043
Observaciones	6

Tabla 12. Análisis de la varianza

<b>ANÁLISIS DE VARIANZA</b>					
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
<b>Regresión</b>	1	868.9344957	868.9344957	2.634	0.179948969
<b>Residuos</b>	4	1319.796304	329.949076		
<b>Total</b>	5	2188.7308			

Tabla 13. Coef de regresión lineal.

	<b>Coeficientes</b>	<b>Error típico</b>	<b>Estadístico t</b>	<b>Probabilidad</b>
Intercepción	-156.1976178	327.4782402	-0.476970982	0.65827232
Variable X 1	2.30109E-07	1.41796E-07	1.622818915	0.179948969

En la regresión lineal se obtuvo como resultado un coeficiente R<sup>2</sup> de 0.397, el cual por ser menor a 1 nos indica que no todos los valores se ajustan de forma lineal. Este resultado se debe a datos atípicos en donde al aumentar el PIB hubo una disminución en la GPC, que pudo deberse a diversos factores no relacionados al PIB. Se obtuvo un valor de F diferente de 1, mayor al valor de F crítico, lo cual indica que sí existe relación entre las variables, por lo tanto se acepta la Hipótesis nula.

A partir de la Ecuación 7 se obtuvieron los valores correspondientes a GPC dentro del modelo.

### **3.6.5. Generación de residuos**

La Generación de residuos sólidos urbanos fue calculada siguiendo la siguiente fórmula:

Ecuación 8:

$$\text{Generación de RSU} = \text{Población} * \text{Producción per cápita}$$

### **3.6.6. Residuos reciclados**

La cantidad de Residuos reciclados fue calculada a partir de la siguiente fórmula:

Ecuación 9:

$$\text{Residuos reciclados} = \\ \text{Fracción de reciclables} * \text{Generación de Residuos sólidos urbanos}$$

### **3.6.7. Generación final de residuos sólidos urbanos**

Por último, la Generación final de residuos sólidos urbanos se calculó aplicando la siguiente fórmula:

Ecuación 10:

$$\text{Generación final de residuos sólidos urbanos} = \\ \text{Generación de Residuos sólidos urbanos} - \text{Residuos reciclados}$$

### **3.6.8 Simulación del modelo**

Una vez establecido el Diagrama Forrester se realizó la simulación de los tres escenarios del sistema, cuyos resultados fueron analizados y comparados con el fin de determinar las variaciones existentes entre cada escenario.

## 4. CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

### 4.1. Identificación de relaciones de influencia entre variables

#### 4.1.1. Discriminación de variables

Para cada una de las variables dependientes del sistema de generación de residuos sólidos urbanos se llevó a cabo una discriminación de las variables independientes que influyen sobre ellas, a excepción de la Generación final de residuos sólidos, ya que al ser la variable principal del modelo, no se desea discriminar aquellas que lo afecten directamente. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 5. Calificación de variables que influyen en la Generación per cápita.

Generación per cápita	Calificación de variables
PIB	0.4452
Normativa	0.1099
Educación	0.1639
Zona climática	0.0330
Zona turística	0.0330
Estaciones del año	0.0511
Hábitos de consumo	0.1639

La generación per Cápita es la cantidad de residuos sólidos emitidos por habitante en una unidad de tiempo. En la Tabla 5 se puede observar que es el Producto interno bruto la variable más influyente sobre la Generación per Cápita. Según Ahmad (2012) la tasa de generación per cápita de residuos sólidos urbanos aumenta con los incrementos en el PIB per cápita, que a su vez influye en el crecimiento económico, la tasa de urbanización y el nivel de vida de los residentes de la ciudad. El PIB está relacionado de manera directamente proporcional con la Generación per Cápita debido a que, un aumento en el PIB se traduce en un aumento en la capacidad adquisitiva de la población, así como un incremento en la producción territorial; a mayor capacidad adquisitiva existirá

un mayor consumo, lo cual aumentará la generación per cápita de residuos sólidos, como ha ocurrido en varias investigaciones a nivel mundial (Di Nola et al., 2018; Sufian & Bala, 2007; Zhao, Ren, & Rotter, 2011). Tanto la Educación de la población como los Hábitos de consumo fueron las variables con una calificación mayor sobre el resto, seguidas por la Normativa aplicada a la gestión de residuos sólidos urbanos. Estas variables tuvieron una mayor calificación que el resto (Estaciones del año, zona climática, zona turística) ya que determinan aspectos de la población directamente relacionados con su comportamiento. Una sociedad educada para lograr una buena gestión de residuos sólidos, desde la enseñanza en escolar hasta universitaria, tendría un conocimiento y hábitos de manejo de residuos que sepa aprovecharlos como una fuente de energía con distintos usos así como separarlos adecuadamente (Gallardo, 2009). Los Hábitos de consumo varían entre poblaciones con distinto nivel socioeconómico y constituyen una variable de gran importancia para la generación de residuos; por ejemplo, se ha evidenciado que en las últimas décadas los patrones de consumo de la población mundial han aumentado considerablemente, con un creciente incremento en la adquisición de plásticos, lo cual ha generado un crecimiento exponencial en la generación per cápita de residuos (Kaza et al., 2018). La normativa aplicada a la gestión municipal de residuos, especialmente aquella que busque cimentar una sociedad de reciclaje en lugar de una sociedad de desechos, resulta de importante para la generación per cápita de residuos. Estudios económicos recientes sobre políticas de gestión de residuos sólidos se centran en instrumentos económicos que ofrecen incentivos para hogares o industrias con el fin de aumentar el porcentaje de reciclaje de cada uno de ellos han obtenido resultados favorables en la reducción de la producción per cápita (Ahmad, 2012; Di Nola et al., 2018; Sufian & Bala, 2007; Sukholthaman & Sharp, 2016; Ulli-Ber et al., 2007; Zhao et al., 2011).

Las variables Estaciones del año, Zona climática y Zona turística, si bien poseen cierta incidencia sobre la GPC, fueron discriminadas por el software y no se tomaron en cuenta para el presente modelo.

Tabla 6. Calificación de variables que influyen en la Población.

<b>Población</b>	<b>Calificación de variables</b>
Mortalidad	0.2828
Natalidad	0.6434
Migración	0.0738

El incremento poblacional afecta de forma directamente proporcional a la generación de residuos sólidos. Esta variable depende de distintos factores, siendo los principales las tasas de natalidad y mortalidad, así como la tasa de migración en el territorio, variables que han sido utilizadas en el modelamiento de sistemas de gestión de residuos sólidos urbanos en distintas investigaciones ((Ahmad, 2012; Al-Khatib et al., 2015; Ávila et al., 2011; Di Nola et al., 2018; Ojoawo, Agbede, & Sangodoyin, 2012; Vega, 2019). En este modelo se utilizaron las variables de natalidad y mortalidad para la construcción del Diagrama Causal, de modo que pueda evidenciarse la retroalimentación existente con la población. Sin embargo, para la construcción del Diagrama Forrester estas variables fueron sustituidas por el Crecimiento Poblacional, debido a la carencia datos específicos para la población a tratar. La tasa de migración fue discriminada y no se tomó en cuenta en este modelo.

Tabla 7. Calificación de variables que influyen en la Fracción de reciclables.

<b>Fracción de reciclados</b>	<b>Calificación de variables</b>
Educación	0.4547
Normativa	0.2630
% Separación en la Fuente	0.1411
Hábitos de consumo	0.1411

En la Tabla 7 se puede observar que la Fracción de reciclados está estrechamente relacionada a la Educación de la población y a la existencia de Normativa aplicada a la gestión de residuos reciclables. Se ha demostrado que la realización de campañas de reciclaje en pequeñas poblaciones, dirigida a todas las edades, resulta en un claro aumento de la fracción de reciclables en la generación per cápita (Aksan & Çelikler, 2019; Lakhan, 2016). La aplicación de

normativa dirigida al reciclaje, como ya se ha mencionado, tiene un gran potencial para aumentar la cantidad de residuos reciclados, sobre todo si ésta maneja un sistema de incentivos que estimulen a la población a llevar buenas prácticas de separación en el hogar y en la industria (Ahmad, 2012; Di Nola et al., 2018; Sufian & Bala, 2007; Sukholthaman & Sharp, 2016; Ulli-Beer et al., 2007; Zhao et al., 2011). Por lo mismo, el porcentaje de separación en la fuente también es significativo, y fue tomado en cuenta para la construcción del Diagrama Causal. Debido a una falta de acceso a los datos correspondientes al cantón Rumiñahui, se decidió retirar esta variable del modelo y no consta en el Diagrama Forrester. Por su parte, los hábitos de consumo determinarán la cantidad de material reciclable que generará la población. Sin embargo, al tratarse de una variable difícilmente cuantificable, se ha discriminado y retirado de este modelo.

#### 4.1.2. Diagrama Causal

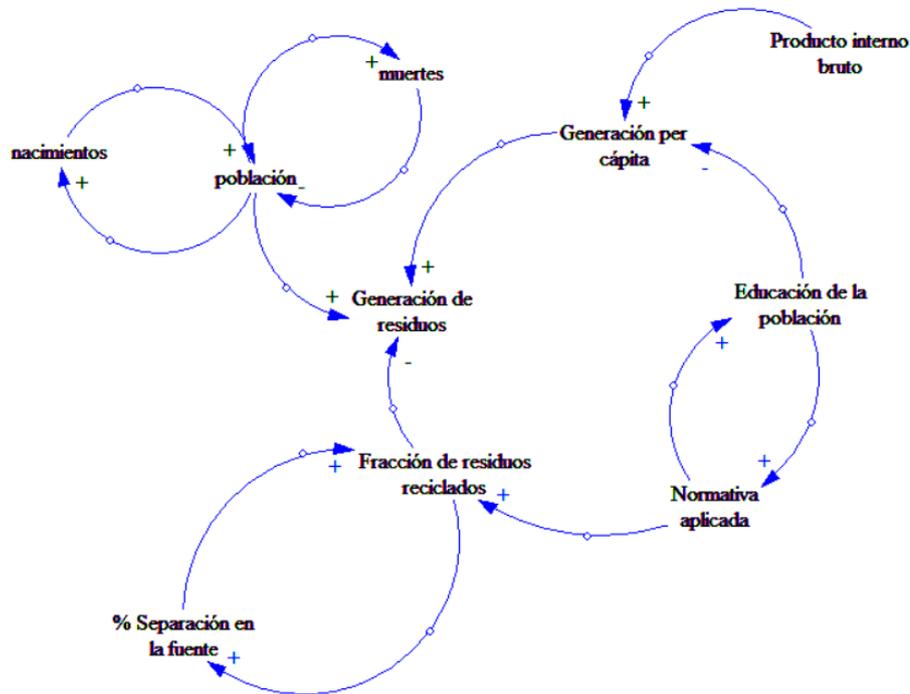


Figura 1. Diagrama Causal del sistema de generación de residuos sólidos urbanos.

En la *Figura 1* se observan las relaciones causa - efecto entre las principales variables que conforman el sistema de generación de residuos sólidos urbanos. Puede observarse la tendencia a la formación de bucles de retroalimentación, esto ocurre cuando en un sistema la salida actúa sobre la entrada. Los bucles de realimentación cumplen esa función, son estructuras bastante frecuentes en los sistemas y desempeñan un papel determinante en el funcionamiento de los mismos (Ferrerías & Gay, 2016). De este modo se puede explicar la retroalimentación positiva existente entre el aumento de la población y el aumento de los nacimientos. Por otro lado, si bien a mayor población existirá un mayor número de muertes (retroalimentación positiva), a mayor número de muertes disminuye la población (retroalimentación). La generación de residuos sólidos está en función de la población y generación per cápita, y se reduce mientras mayor sea la cantidad de residuos reciclados. La GPC aumenta en función del incremento del Producto Interno Bruto, y disminuye mientras mayor sea la educación de la población en cuanto a la gestión de RSU. A su vez, la educación interactúa en una retroalimentación positiva con la normativa aplicada. Por su parte, la fracción de residuos reciclados aumenta con el aumento de normativa de gestión de residuos reciclados, así como con el incremento del % de separación en la fuente, retroalimentándose con éste último de forma positiva.

A partir de esta representación gráfica se ha conseguido llegar a representar una buena aproximación la situación real, ya que el Diagrama Causal permite entender de una forma más amplia los componentes del sistema y sus interacciones, de modo que se facilite su explicación y su comprensión (Ramírez Flórez et al., 2017).



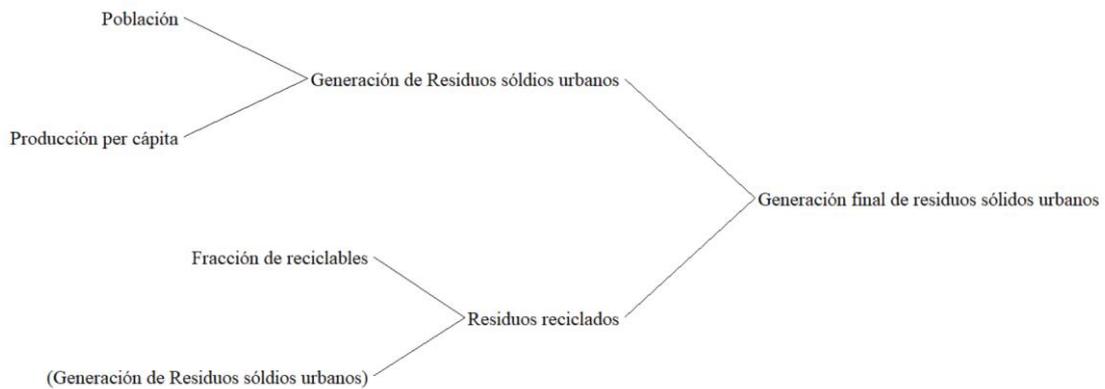


Figura 3. Árbol de causas del sistema de generación de residuos sólidos urbanos

En la figura 3 se puede observar las relaciones entre variables que determinan la Generación final de residuos sólidos urbanos.

#### 4.2.2. Primer escenario

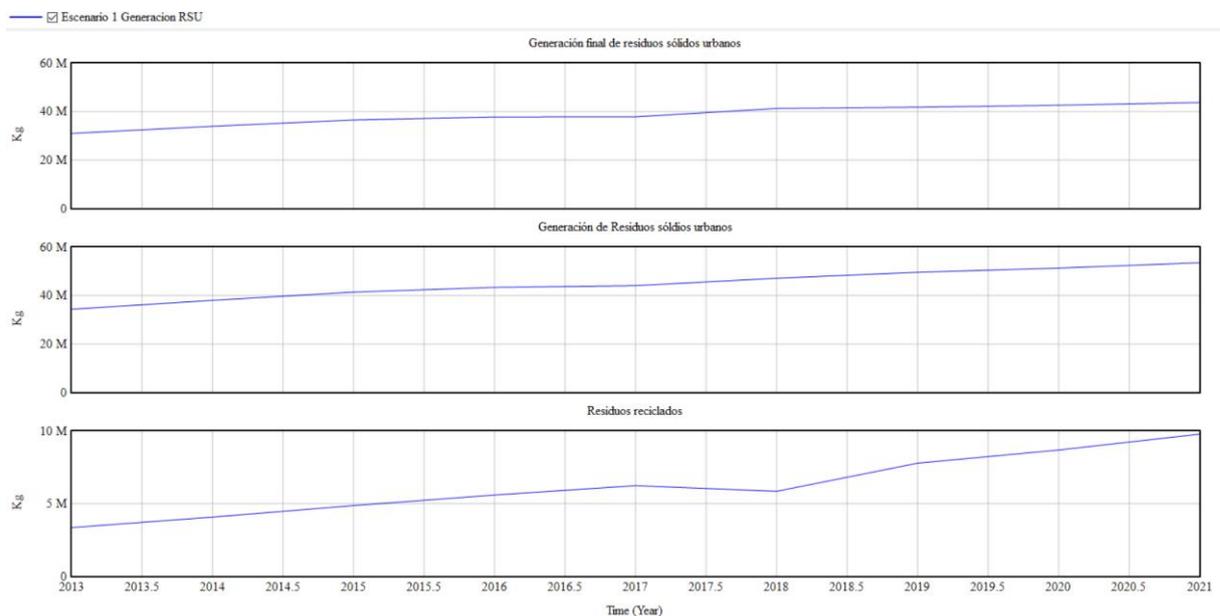
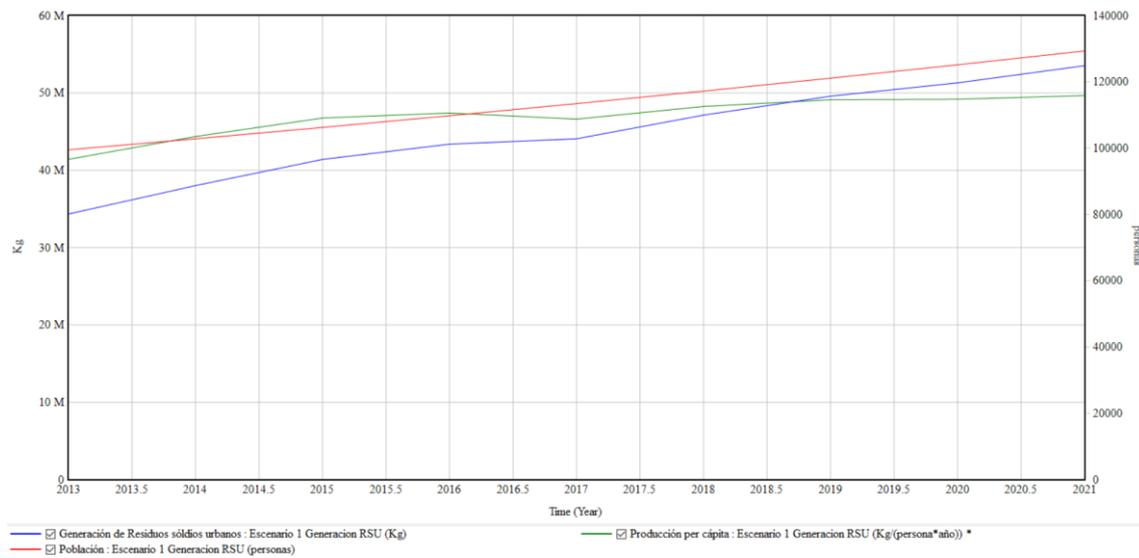


Figura 8. Simulación de Generación final de residuos sólidos urbanos 2013 – 2021. (Escenario 1).

En la figura 8 se pueden observar los resultados de la simulación para el primer escenario. Se observa una tendencia ascendente en la generación final de

residuos, cuyo valor se ve disminuido en función de la cantidad de residuos reciclados, cuya tendencia ascendente muestra como habría subido la tasa de reciclaje en el cantón Rumiñahui del modo que estaba previsto para el presente año antes de que se desarrolle la crisis sanitaria debido a la pandemia causada por el Coronavirus. La tendencia creciente de residuos reciclados es un escenario favorable, a pesar de aumentar la tasa de residuos reciclados solo en 0.079 para el año 2020, esto obedece al aumento promedio en esta tasa a lo largo de los años para la realidad del cantón.



**Figura 9.** Simulación de Generación de RSU, población y generación per cápita.

La influencia directa de las variables principales Población y Generación per cápita sobre la generación de residuos sólidos puede observarse en la *figura 9*. Algunas investigaciones sugieren que el crecimiento poblacional es el factor principal que incide en el incremento de la generación de residuos sólidos urbanos, siendo considerado este uno de los problemas ambientales más significativos a los que se enfrenta la humanidad. El crecimiento poblacional del cantón Rumiñahui es de aproximadamente el 3.33% anual, por lo cual la tendencia de incremento de generación de residuos continuará en aumento durante los próximos años, e incluso es posible que la tasa de crecimiento aumente también (Ahmad, 2012; Di Nola et al., 2018; Kaza et al., 2018; Redondo y Solano , 2010; Vega, 2019).

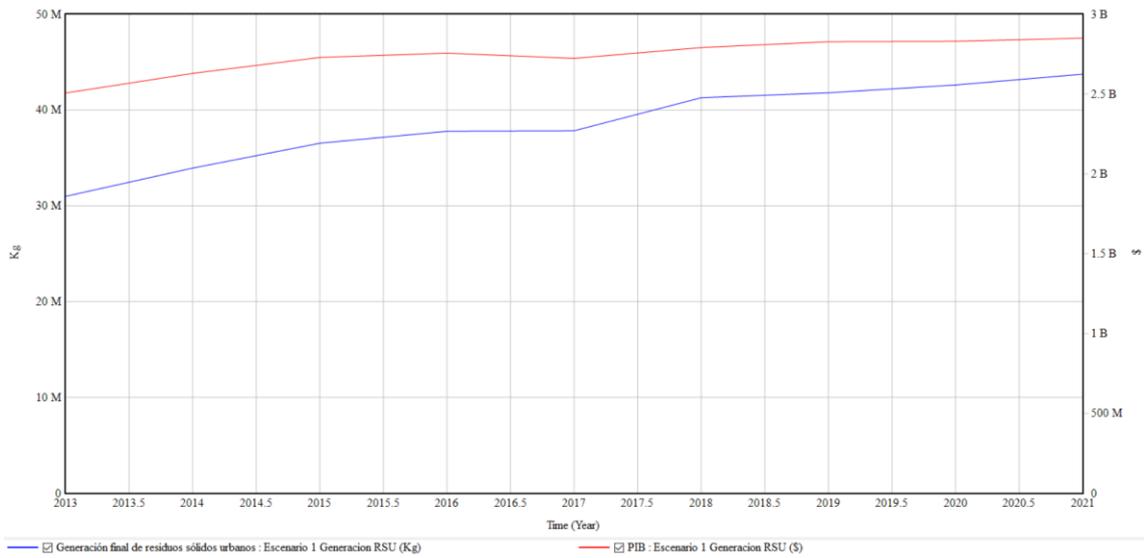
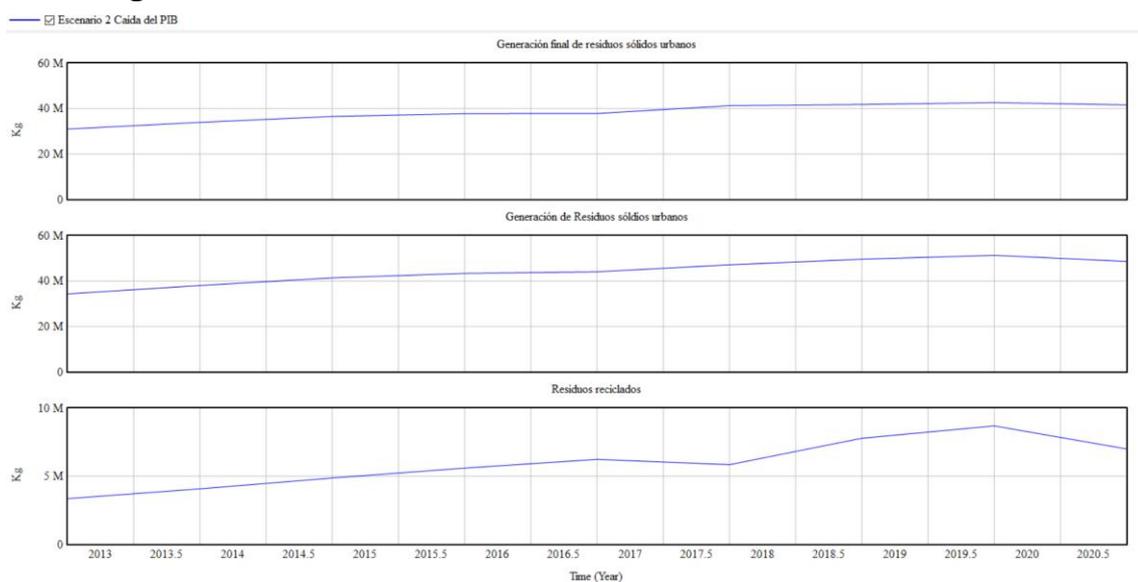


Figura 10. Simulación de PIB vs Generación final de RSU (Escenario 1)

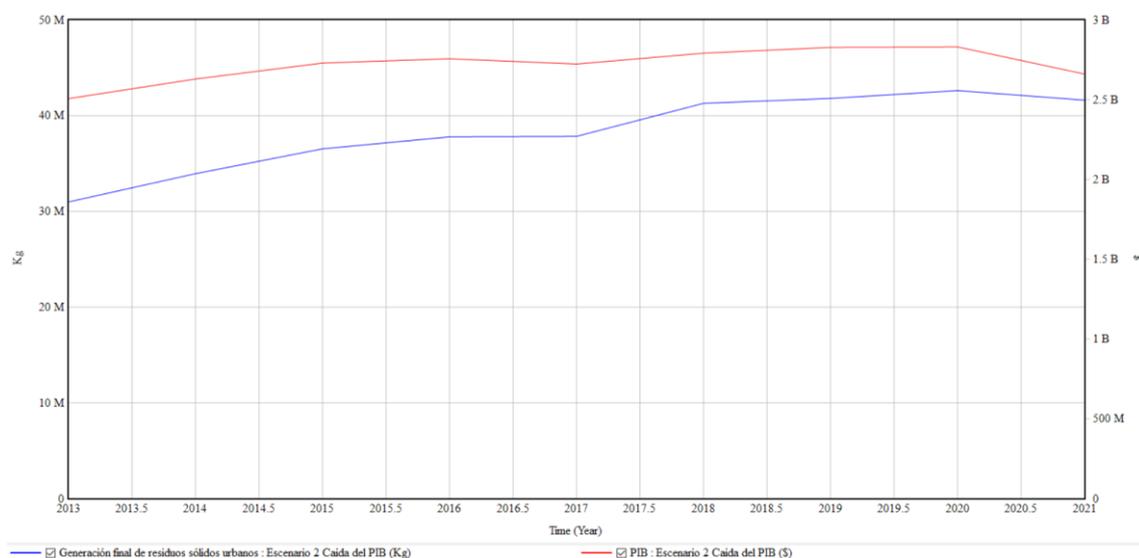
Este escenario contempla un aumento en la tasa de crecimiento del PIB ecuatoriano del 0,7%, el cual estaba previsto para el año 2020 inicialmente (Banco Central del Ecuador, 2020), lo cual tiene una influencia directa sobre la generación per cápita y por lo tanto, sobre la generación final de residuos sólidos.

#### 4.2.3 Segundo Escenario



*Figura 11.* Simulación de Generación final de residuos sólidos urbanos 2013 – 2021. (Escenario 2).

Los resultados de la simulación del segundo escenario pueden observarse en la Figura 11. Se observa una tendencia negativa desde el año 2020 hasta el 2021, provocada por la caída del PIB correspondiente con la emergencia sanitaria del COVID-19. La cantidad de residuos reciclados también sufrió un decrecimiento durante ese período de tiempo, debido a que no existió recolección de material reciclado durante los meses de abril y mayo en el cantón, y durante el mes de marzo la cantidad de reciclados fue baja en comparación a enero y febrero (Rumiñahui - ASEO EPM, 2020)



*Figura 12.* Simulación de PIB vs Generación final de RSU (Escenario 2)

El Banco Mundial calculó un decrecimiento del 6% en el Producto Interno Bruto ecuatoriano a lo largo del año 2020 debido a la crisis sanitaria y económica que atraviesa el país y el planeta (Domínguez, 2020). En la *figura 12* se puede apreciar cómo esta caída del PIB incide directamente con la generación final de residuos sólidos del cantón Rumiñahui desde el inicio del presente año, debido al decrecimiento de la GPC que esta variación provoca.

Este resultado coincide con un estudio realizado en México entre los años 2003 y 2015, en el cual se compara el crecimiento del Producto Interno Bruto junto con el gasto del consumo final privado y la generación de residuos sólidos urbanos,

donde se observó que el PIB y la generación de RSU crecieron a la par prácticamente en la misma tasa (alrededor de 2.77% anual). El autor señala que esta relación se ha observado también en otras regiones del mundo y se traduce en que a mayores niveles de consumo se produce un mayor volumen de residuos (Semarnat, 2016)

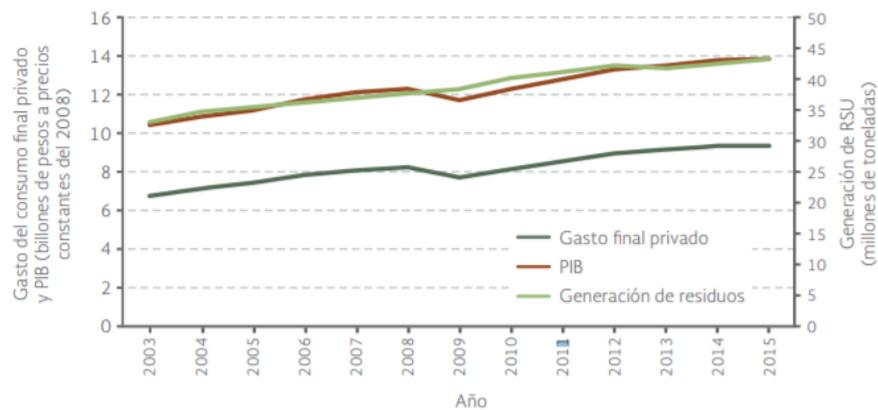


Figura 13. Generación de RSU, producto interno bruto (PIB) y gasto del consumo final privado en México, 2003 – 2015

Tomado de (Semarnat, 2016).

#### 4.2.4. Tercer Escenario

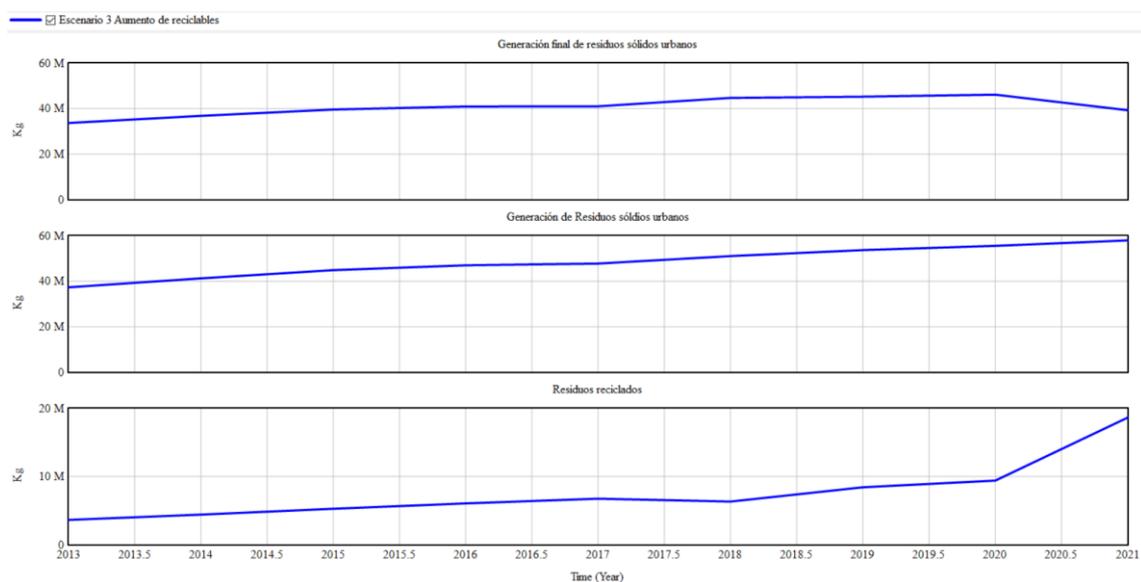


Figura 14. Simulación de Generación final de residuos sólidos urbanos 2013 – 2021. (Escenario 3).

El tercer escenario asume un aumento significativo en la tasa de residuos reciclados de un 80% en el 2020 con respecto al año pasado. Un aumento tan grande en la tasa de reciclaje se han observado en países como Canadá y Suiza en largos períodos de tiempo, donde se ha incorporado la gestión de material reciclable en la educación normal de la población, además de existir fuertes políticas sobre el uso de plástico y se incentiva a reciclar al reciclaje a través de beneficios monetarios tanto para empresas como la la población general (Lakhan, 2016; Ulli-Beer et al., 2007).

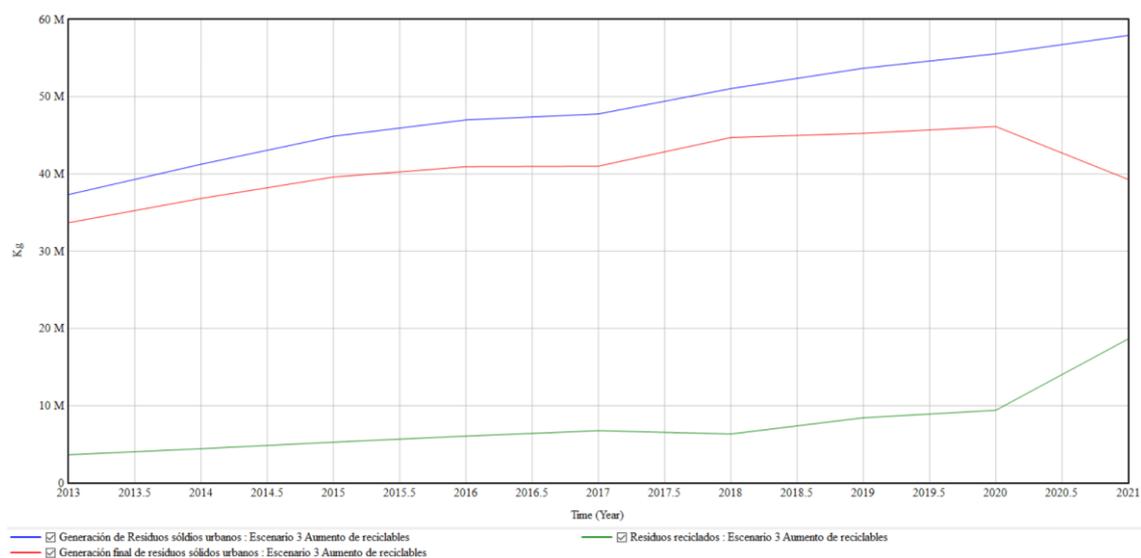


Figura 15. Simulación Residuos reciclados, Generación de RSU y Generación final de RSU.

En la figura 15 puede observarse cómo un incremento en la cantidad de residuos reciclados disminuye la generación de residuos sólidos y provoca una tendencia negativa de la misma. Según el informe realizado por el banco mundial titulado What a Waste, ha existido un progreso mundial inestimable en la tasa de aumento de residuos reciclados y compostados, la cual ha ayudado a disminuir la generación total de residuos cuyo aumento progresivo resulta sumamente preocupante (Kaza et al., 2018).

#### 4.2.5. Comparación entre escenarios

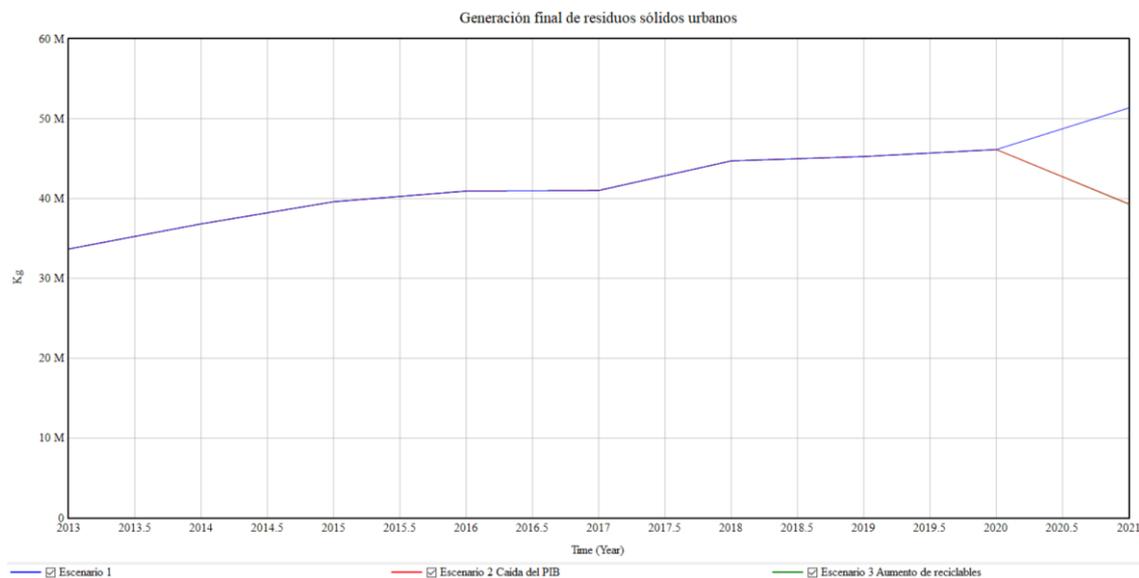


Figura 14. Comparación de la simulación de Generación final de residuos sólidos urbanos 2013 – 2021 en los 3 escenarios.

La Figura 14 presenta una comparación entre los 3 escenarios propuestos. Como se puede observar, la Generación final de residuos sólidos varía desde el inicio del año 2020 en cada caso. El primer escenario, donde no se contempló la crisis pandémica por la que atraviesa el mundo, registró un incremento en la generación de residuos acorde con el crecimiento del PIB previsto para el presente año. El segundo escenario revela una tendencia negativa el último año equivalente a reducción del 28.38% de la generación final de RSU del primer escenario, el cual es un valor significativo y representa un aproximado a la realidad actual en el sistema de generación de RSU en el cantón Rumiñahui. El tercer escenario simula un aumento en la tasa de residuos reciclados del 80% con respecto durante al año 2020 con respecto al año pasado. Se observó una reducción del 24.47% con respecto al primer escenario, y del 0.12% con respecto al segundo escenario. Se puede destacar que la cantidad de residuos reciclados tiene una influencia directamente proporcional a la generación final y por lo tanto es un factor clave para la reducción de la cantidad de residuos que llegan al sitio

de disposición final en el cantón, logrando un valor de generación de RSU incluso menor al provocado por la pandemia del COVID-19. Por otro lado una reducción en el PIB es circunstancial, y afecta gravemente la economía del país y del cantón en específico, lo cual afectará a su vez la gestión de residuos, como ocurrió con la disminución de reciclaje en los últimos meses. No se trata por lo tanto de un escenario deseable. Si bien es cierto que a un mayor PIB mayor será la generación de RSU, si esta se maneja adecuadamente se pueden lograr cambios positivos en la gestión de residuos sólidos urbanos y de material reciclable, lo cual podrá controlar la creciente generación de RSU en el cantón. Varias investigaciones que han tomado en cuenta la relación entre el PIB y la generación de RSU destacan que el PIB a pesar de ser un fuerte indicador del crecimiento de la cantidad de residuos sólidos generados por una población, no se trata de un factor que se desee modificar con el fin de reducir el volumen de RSU generados; por otro lado, son la generación per cápita y la cantidad de residuos reciclados los factores clave que pueden modificar positivamente el sistema, y esto solo puede lograrse a partir de educación a la población y la aplicación adecuada de normativa (Dace, Bazbauers, Berzina, & Davidsen, 2014; Karavezyris, Timpe, & Marzi, 2002; Kollikkathara, Feng, & Yu, 2010)

#### 4.3. Validación del modelo

Tabla 14. Residuos sólidos generados en el cantón Rumiñahui

<b>Año</b>	<b>RS Generados Kg/ año</b>	<b>RS Generados Kg/ mes</b>
2013	35531.56	2960.963333
2014	38258.23	3188.185833
2015	38277.21	3189.7675
2016	40181.8	3348.483333
2017	46962.91	3913.575833
2018	44709.56	3725.796667
2019	46281.61	3856.800833
2020	18102.53	3460.21333

Tabla 15. Resultados de simulación de modelo de generación de RSU en 3 escenarios

<b>Año</b>	<b>Escenario 1 Kg/año</b>	<b>Escenario 1 Kg/mes</b>	<b>Escenario 2 Kg/año</b>	<b>Escenario 2 Kg/mes</b>	<b>Escenario 3 Kg/año</b>	<b>Escenario 3 Kg/mes</b>
2013	36829496	3069124.667	36829496	3069124.667	36829496	3069125
2014	39598508	3299875.667	39598508	3299875.667	39598508	3299876
2015	40935936	3411328	40935936	3411328	40935936	3411328
2016	41008560	3417380	41008560	3417380	41008560	3417380
2017	44715100	3726258.333	44715100	3726258.333	44715100	3726258
2018	45254660	3771221.667	45254660	3771221.667	45254660	3771222
2019	46135968	3844664	46135968	3844664	46135968	3844664
2020	51343156	4278596.333	39338172	3278181	39164532	3263711

En la tabla 14 se observan los valores de generación de residuos sólidos urbanos provenientes del Cantón Rumiñahui que llegaron hacia el Relleno Sanitario del Distrito Metropolitano de Quito. Como se puede observar, el modelo realizado logró simular valores cercanos a la realidad del sistema. Se puede comparar la generación mensual promedio para el año 2020 (promedio entre los valores de los 3 meses de duración de la pandemia) se diferencian con el resultado obtenido en el escenario 2 durante la misma fecha, con una variación del 8.3%. A partir de esto es posible decir que la simulación modelada es válida.

## **5. CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **5.1 Conclusiones**

Se elaboró el modelo dinámico para el sistema de generación de residuos sólidos urbanos asociados al aumento poblacional, al aumento del Producto interno bruto y la cantidad de residuos reciclados aplicado al cantón Rumiñahui, alcanzando resultados que se asemejan a la realidad del sistema.

Se identificaron las relaciones de influencia entre las variables que inciden en la generación de RSU con lo cual se obtuvo una mejor comprensión del complejo sistema. Sin embargo, se descartaron variables de importancia como fueron la educación de la población, los hábitos de consumo y la aplicación de normativa de gestión de residuos ya que no se contó con los datos necesarios para aplicarlas dentro del modelo, lo cual generó un margen de error en la variable de salida.

Se valoró el modelo dinámico del sistema simulando distintos escenarios, incluyendo uno acorde con la realidad actual, y se validó el modelo comparando los datos de salida con datos reales de generación de residuos sólidos en el cantón Rumiñahui.

Se determinó que un incremento significativo en la tasa de reciclados puede tener una incidencia en la generación de residuos aún mayor a la que se obtuvo con una fuerte caída del PIB nacional.

Se observó la importancia del PIB como variable estrechamente relacionada a la generación de RSU y el modo en que una caída del mismo puede afectar al sistema de residuos sólidos.

Se concluye que a pesar de la relación entre PIB y generación de RSU, son las variables de generación per cápita y cantidad de residuos reciclados aquellas que juegan roles clave en la gestión del sistema, y es hacia ellas donde debe dirigir su atención la autoridad competente para lograr una mejor estabilidad en el actual crecimiento del volumen de continuo de generación de residuos sólidos.

## 5.2 Recomendaciones

Se recomienda en futuras investigaciones tomar en cuenta para la construcción del modelo variables como la educación de la población, la aplicación de normativa y los hábitos de consumo, de modo que el sistema logre ser representado de una forma más aproximada a la realidad.

Se recomienda en futuras investigaciones el uso de información específica para cada territorio, ya que en este modelo los valores de la tasa de crecimiento PIB fueron los correspondientes a la realidad nacional al no tener acceso a los valores específicos del cantón Rumiñahui.

Se recomienda la aplicación de la dinámica de sistemas para la comprensión de sistemas complejos y resolución de problemas, ya que éste enfoque permite ampliar la visión del sistema y determinar las variables clave que pueden cambiarse para lograr un objetivo deseado.

## 6. REFERENCIAS

- Ahmad, K. (2012). A System Dynamics Modeling of Municipal Solid Waste Management Systems in Delhi. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 01(04), 628–641.  
<https://doi.org/10.15623/ijret.2012.0104014>
- Aksan, Z., & Çelikler, D. (2019). Recycling awareness education: Its impact on knowledge levels of science teacher candidates. *International Electronic Journal of Environmental Education*, 9(2), 81–105.
- Al-Khatib, I. A., Eleyan, D., & Garfield, J. (2015). A system dynamics model to predict municipal waste generation and management costs in developing areas. *Journal of Solid Waste Technology and Management*, 41(2), 109–120. <https://doi.org/10.5276/JSWTM.2015.109>
- ATC- Innova. (2020). VENSIM ® Dinámica de Sistemas. Retrieved May 8, 2020, from <http://atc-innova.com/>
- Ávila, S. L., Nieto, M. S., Jiménez, D. C., & Osorio, J. C. (2011). *Análisis del impacto generado en un Sistema de Gestión Integral de Residuos Sólidos por el aumento de los residuos asociados al crecimiento de la población a través de Dinámica de Sistemas*. Bogotá.
- Banco Central del Ecuador. (2020, January 17). La economía ecuatoriana se recuperará 0,7% durante el 2020. Retrieved July 5, 2020, from <https://www.bce.fin.ec/index.php/boletines-de-prensa-archivo/item/1348-la-economía-ecuatoriana-se-recuperará-07-durante-el-2020>
- Beatriz, A., & Rodríguez, L. (2011). *Sistemas y Modelos*.
- Cova, W. J. D., Regional, F., & Rioja, L. (2016). *Simulación y un toque de Epistemología*. Retrieved from <http://www.edutecne.utn.edu.ar>
- Dace, E., Bazbauers, G., Berzina, A., & Davidsen, P. I. (2014). System dynamics model for analyzing effects of eco-design policy on packaging waste management system. *Resources, Conservation and Recycling*, 87,

175–190. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.04.004>

Di Nola, M. F., Escapa, M., & Ansah, J. P. (2018). *Modelling solid waste management solutions: The case of Campania, Italy*.

<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.06.006>

Domínguez, C. (2020, April 14). El Banco Mundial calcula que la economía ecuatoriana decrecerá 6 % en 2020 a causa de la crisis del covid-19 - Pichincha Universal. Retrieved July 5, 2020, from <http://www.pichinchacomunicaciones.com.ec/el-banco-mundial-calcula-que-la-economia-ecuatoriana-decrecera-6-en-2020-a-causa-de-la-crisis-del-covid-19/>

Donado, J. de M., Canto, S., & Morilla, F. (2005). *Fundamentos de la dinámica de sistemas y Modelos de dinámica de sistemas en epidemiología*. Madrid.

Dyson, B., & Chang, N. Bin. (2005). Forecasting municipal solid waste generation in a fast-growing urban region with system dynamics modeling. *Waste Management*, 25(7), 669–679.

<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.10.005>

EMGIRS. (2019). *INFORME DE LA SITUACIÓN ACTUAL DE LA EMPRESA PÚBLICA METROPOLITANA DE GESTIÓN DE INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS ~1~: CONTENIDO*. Retrieved from [www.emgirs.gob.ec](http://www.emgirs.gob.ec)

Ferreras, M. Á., & Gay, A. (2016). El enfoque sistémico. In *Enfoque sistémico*.

Forrester, J. (2000). Modelado en dinámica de sistemas. *Dinámica de Sistemas*.

Gallardo, A. (2009). Análisis de los factores que influyen en la generación y composición de los residuos sólidos urbanos a considerar para el diseño de un modelo de caracterización. *3 Simposio Iberoamericano De Ingeniería De Residuos*, 1–9.

García, J. M. (2019). *Teoría y ejercicios prácticos de Dinámica de Sistemas*.

- Retrieved from <http://www.dinamica-de-sistemas.com/libros/sistemas.htm>
- Ibarra Vega, D., & Redondo, J. (2015). *DINÁMICA DE SISTEMAS, UNA HERRAMIENTA PARA LA EDUCACIÓN AMBIENTAL EN INGENIERÍA*. 152–164. <https://doi.org/10.17151/luaz.2015.41.9>
- Karavezyris, V., Timpe, K. P., & Marzi, R. (2002). Application of system dynamics and fuzzy logic to forecasting of municipal solid waste. *Mathematics and Computers in Simulation*, 60(3–5), 149–158. [https://doi.org/10.1016/S0378-4754\(02\)00010-1](https://doi.org/10.1016/S0378-4754(02)00010-1)
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Woerden, F. Van. (2018). *A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050 OVERVIEW Tokyo Development Learning Center*. Retrieved from <http://www.worldbank.org/what-a-waste.JapanGov>
- Kollikkathara, N., Feng, H., & Yu, D. (2010). A system dynamic modeling approach for evaluating municipal solid waste generation, landfill capacity and related cost management issues. *Waste Management*, 30(11), 2194–2203. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.05.012>
- Lakhan, C. (2016). Effectiveness of recycling promotion and education initiatives among first-generation ethnic minorities in Ontario, Canada. *Social Sciences*, 5(2). <https://doi.org/10.3390/socsci5020023>
- Navia Estrada, J. F. (2011). LA INVESTIGACIÓN EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN . In Agroforestería (Ed.), *Agroforesteria*. Retrieved from <https://agroforesteria.wordpress.com/2011/03/15/la-investigacion-en-sistemas-de-produccion/>
- Ojoawo, S. O., Agbede, O. A., & Sangodoyin, A. Y. (2012). System Dynamics Modeling of Dumpsite Leachate Control in Ogbomosoland, Nigeria. *Journal of Environmental Protection*, 3, 120–128. <https://doi.org/10.4236/jep.2012.31015>
- Popli, K., Sudibya, G. L., & Kim, S. (2017). A Review of Solid Waste Management using System Dynamics Modeling. *Journal of Environmental*

- Science International*, 26(10), 1185–1200.  
<https://doi.org/10.5322/jesi.2017.26.10.1185>
- Ramírez Flórez, G., Giraldo Correa, L. F., Urrea, N. T., & Osorio Gómez, J. C. (2017). *Simulación dinámica de una alternativa de generación de energía a partir de residuos Dynamic simulation of an alternative waste to energy*. 7(1), 67–77. <https://doi.org/10.21789/22561498.1191>
- Rivera, J. R. (2011). *GEOTECNIA DE RELLENOS SANITARIOS Evaluation of Blast-Induced Damage Zone on underground excavation and its influence in deformation modulus changes View project Geotechnical Dam type Selection View project*. (July). <https://doi.org/10.13140/2.1.4040.5121>
- Rumiñahui-Aseo EPM. (2017). *ACTUALIZACIÓN DEL PLAN DE GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS NO PELIGROSOS CANTÓN RUMIÑAHUI PERÍODO 2016-2019*. Retrieved from [http://www.ruminahui-aseo.gob.ec/periodo2017/documentos/act\\_plan\\_gestion\\_rs.pdf](http://www.ruminahui-aseo.gob.ec/periodo2017/documentos/act_plan_gestion_rs.pdf)
- Rumiñahui - ASEO EPM. (2019). *INFORME DE GESTIÓN 2011- 2018*. Sangolquí.
- Rumiñahui - ASEO EPM. (2020). *FICHA TÉCNICA, TOTAL Kgs. RECICLADOS AL MES*. Sangolquí.
- Rumiñahui, M. de. (2009). *ORDENANZA DE GESTIÓN AMBIENTAL*. 2, 3500.
- Schejtman, L., & Irurita, N. (2010). *Diagnóstico sobre la gestión de los residuos sólidos urbanos en municipios de la Argentina*.
- Semarnat. (2016). Residuos. In *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave, de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde*. (pp. 434–435). <https://doi.org/10.1001/jama.1978.03280340064027>
- Simonetto, E. D. O., Modro, N. R., & Dalmolin, L. C. (2013). Assessment of Energy Saving in Waste Recycling using System Dynamics. *Revista de Administração Da UFSM*, 6(2), 319–332.

<https://doi.org/10.5902/198346597166>

Sufian, M. A., & Bala, B. K. (2007). Modeling of urban solid waste management system: The case of Dhaka city. *Waste Management*, 27(7), 858–868.

<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.04.011>

Sukholthaman, P., & Sharp, A. (2016). A system dynamics model to evaluate effects of source separation of municipal solid waste management: A case of Bangkok, Thailand. *Waste Management*, 52, 50–61.

<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.026>

Tello, P., Martínez, E., Daza, D., Soulier, M., & Terraza, H. (2011). *Informe de la evaluación regional del manejo de residuos sólidos urbanos en América Latina y el Caribe 201*. Retrieved from

<https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Informe-de-la-evaluación-regional-del-manejo-de-residuos-sólidos-urbanos-en-América-Latina-y-el-Caribe-2010.pdf>

Toro, R., Szantó, M., Pacheco, J., Contreras, E., & Gálvez, A. (2016). Guía general para la gestión de residuos sólidos domiciliarios. *Manuales de La CEPAL*, 209. Retrieved from

<https://www.cepal.org/es/publicaciones/40407-guia-general-la-gestion-residuos-solidos-domiciliarios>

Ulli-Beer, S., Andersen, D. F., & Richardson, G. P. (2007). Financing a competitive recycling initiative in Switzerland. *Ecological Economics*, 62(3–4), 727–739. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2006.09.017>

Vega, C. (2019). Dynamic analysis of the effects of the solid waste system under the systems approach in the city of Chimbote. *Conocimiento Para El Desarrollo*, 10(2), 251–256. <https://doi.org/10.17268/cpd.2019.02.12>

Veritas, B. (2008). *Manual para la formación en medio ambiente* (Vol. 1).

Retrieved from

[https://books.google.com.ec/books?id=J7rMDpW49ZQC&pg=PA4&lpg=PA4&dq=Bureau+Veritas.+\(2008\).+Manual+para+la+Formación+en+Medio+Ambiente.+Valladolid:+LEX+NOVA.+S.A.&source=bl&ots=i\\_G2Z8RbxO&sig](https://books.google.com.ec/books?id=J7rMDpW49ZQC&pg=PA4&lpg=PA4&dq=Bureau+Veritas.+(2008).+Manual+para+la+Formación+en+Medio+Ambiente.+Valladolid:+LEX+NOVA.+S.A.&source=bl&ots=i_G2Z8RbxO&sig)

=ACfU3U0XaUS5yMOx3R\_m5us7FDKaATk\_vA&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwj-ppv8urfqAhWPY98KHbgvDKUQ6AEwBXoECAoQAQ#v=onepage&q=Bureau Veritas. (2008). Manual para la Formación en Medio Ambiente. Valladolid%3A LEX NOVA. S.A.&f=false

Zhao, W., Ren, H., & Rotter, V. S. (2011). A system dynamics model for evaluating the alternative of type in construction and demolition waste recycling center - The case of Chongqing, China. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(11), 933–944.  
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.04.011>

