



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS**  
**NATURALES**

**CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

**“EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE GESTIÓN INTEGRAL DE  
RESIDUOS SÓLIDOS APLICANDO SISTEMAS DINÁMICOS CON EL  
SOFTWARE VENSIM EN EL CANTON PUJILI PROVINCIA DE  
COTOPAXI PERIODO 2022 - 2023.”**

Proyecto de Investigación presentado previo a la obtención del Título  
de Ingeniero Ambiental

**Autor:**

Vallejo Santamaría José Hernán

**Tutor:**

Ágreda Oña José Luis

**LATACUNGA - ECUADOR**

**Febrero- 2024**

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, **Vallejo Santamaría José Hernán**, con cédula de ciudadanía No. **050411663-3**, declaro ser autor del presente proyecto de investigación **“Evaluación del sistema de gestión integral de residuos sólidos aplicando sistemas dinámicos con el software Vensim en el cantón Pujilí provincia de Cotopaxi periodo 2022 - 2023.”** siendo el Magister Agreda Oña José Luis, tutor del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Latacunga, 20 de febrero del 2024



José Hernán Vallejo Santamaría  
CC: 050411663-3  
ESTUDIANTE

## **CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR**

Comparecen a la celebración del presente instrumento de cesión no exclusiva de obra, que celebran de una parte **VALLEJO SANTAMARÍA JOSÉ HERNÁN**, identificado con cédula de ciudadanía **050411663-3** de estado civil soltero, a quien en lo sucesivo se denominará **EL CEDENTE**; y, de otra parte, la Doctora Idalia Eleonara Pacheco Tigselema, en calidad de Rectora, y por tanto representante legal de la Universidad Técnica de Cotopaxi, con domicilio en la Av. Simón Rodríguez, Barrio El Ejido, Sector San Felipe, a quien en lo sucesivo se le denominará **LA CESIONARIA** en los términos contenidos en las cláusulas siguientes:

**ANTECEDENTES: CLÁUSULA PRIMERA.** - **EL CEDENTE** es una persona natural estudiante de la carrera de Agronomía, titular de los derechos patrimoniales y morales sobre el trabajo de grado “**EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS APLICANDO SISTEMAS DINÁMICOS CON EL SOFTWARE VENSIM EN EL CANTÓN PUJILÍ PROVINCIA DE COTOPAXI PERIODO 2022 - 2023.**”, la cual se encuentra elaborada según los requerimientos académicos propios de la Facultad; y, las características que a continuación se detallan:

### **Historial Académico**

Inicio de la carrera: abril 2018-agosto 2018

Finalización de la carrera: octubre 2023 – marzo 2024

Aprobación en Consejo Directivo: 25 de octubre del 2022

Tutor: Ing. Agreda José Luis

Tema: “**EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS APLICANDO SISTEMAS DINÁMICOS CON EL SOFTWARE VENSIM EN EL CANTÓN PUJILÍ PROVINCIA DE COTOPAXI PERIODO 2022 - 2023.**”

**CLÁUSULA SEGUNDA.** - **LA CESIONARIA** es una persona jurídica de derecho público creada por ley, cuya actividad principal está encaminada a la educación superior formando profesionales de tercer y cuarto nivel normada por la legislación ecuatoriana la misma que establece como requisito obligatorio para publicación de trabajos de investigación de grado en su repositorio institucional.

**CLÁUSULA TERCERA.** - Por el presente contrato, **EL CEDENTE** autoriza a **LA CESIONARIA** a explotar el trabajo de grado en forma exclusiva dentro del territorio de la República del Ecuador.

**CLÁUSULA CUARTA. - OBJETO DEL CONTRATO:** Por el presente contrato **EL CEDENTE**, transfiere definitivamente a **LA CESIONARIA** y en forma exclusiva los siguientes derechos patrimoniales; pudiendo a partir de la firma del contrato, realizar, autorizar o prohibir:

- a) La reproducción parcial del trabajo de grado por medio de su fijación en el soporte informático conocido como repositorio institucional que se ajuste a ese fin.
- b) La traducción, adaptación, arreglo u otra transformación del trabajo de grado con fines académicos y de consulta.
- c) La importación al territorio nacional de copias del trabajo de grado hechas sin autorización del titular del derecho por cualquier medio incluyendo mediante transmisión.
- d) **CLÁUSULA QUINTA.** - El presente contrato se lo realiza a título gratuito por lo que **LA CESIONARIA** no se halla obligada a reconocer pago alguno en igual sentido **EL CEDENTE** declara que no existe obligación pendiente a su favor.

**CLÁUSULA SEXTA.** - El presente contrato tendrá una duración indefinida, contados a partir de la firma del presente instrumento por ambas partes.

**CLÁUSULA SÉPTIMA. - CLÁUSULA DE EXCLUSIVIDAD.** - Por medio del presente contrato, se cede en favor de **LA CESIONARIA** el derecho a explotar la obra en forma exclusiva, dentro del marco establecido en la cláusula cuarta, lo que implica que ninguna otra persona incluyendo **EL CEDENTE** podrá utilizarla.

**CLÁUSULA OCTAVA. - LICENCIA A FAVOR DE TERCEROS.** - **LA CESIONARIA** podrá licenciar la investigación a terceras personas siempre que cuente con el consentimiento de **EL CEDENTE** en forma escrita.

**CLÁUSULA NOVENA.** - El incumplimiento de la obligación asumida por las partes en la cláusula cuarta, constituirá causal de resolución del presente contrato. En consecuencia, la resolución se producirá de pleno derecho cuando una de las partes comunique, por carta notarial, a la otra que quiere valerse de esta cláusula.

**CLÁUSULA DÉCIMA.** - En todo lo no previsto por las partes en el presente contrato, ambas se someten a lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, Código Civil y demás del sistema jurídico que resulten aplicables.

**CLÁUSULA UNDÉCIMA.** - Las controversias que pudieran suscitarse en torno al presente contrato, serán sometidas a mediación, mediante el Centro de Mediación del Consejo de la Judicatura en la ciudad de Latacunga. La resolución adoptada será definitiva e inapelable, así como de obligatorio cumplimiento y ejecución para las partes y, en su caso, para la sociedad. El costo de tasas judiciales por tal concepto será cubierto por parte del estudiante que lo solicitare.

En señal de conformidad las partes suscriben este documento en dos ejemplares de igual valor y tenor en la ciudad de Latacunga, a los 20 días del mes de febrero del 2024.

José Hernán Vallejo Santamaría

**EL CEDENTE**

Dra. Idalia Pacheco Tigselema, Ph.D

**LA CESIONARIA**

## **AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título:

“EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS APLICANDO SISTEMAS DINÁMICOS CON EL SOFTWARE VENSIM EN EL CANTON PUJILI PROVINCIA DE COTOPAXI PERIODO 2022 - 2023.”, de Vallejo Santamaría José Hernán, de la carrera de Ingeniería Ambiental, considero que el presente trabajo investigativo es merecedor del Aval de aprobación al cumplir las normas, técnicas y formatos previstos, así como también ha incorporado las observaciones y recomendaciones propuestas en la Pre defensa.

Latacunga, 20 de febrero del 2024



Ing. José Luis Ágreda Oña Mg.

DOCENTE TUTOR

CC: 040133210-1

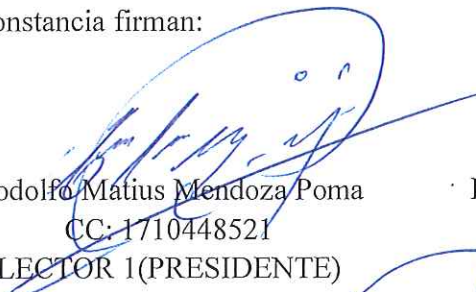
## AVAL DE APROBACION DEL TRIBUNAL DE TITULACION

En calidad de Tribunal de Lectores, aprobamos el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi; y, por la Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales; por cuanto, el postulante: Vallejo Santamaría José Hernán, con el título del Proyecto de Conservación del suelo: “EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS APLICANDO SISTEMAS DINÁMICOS CON EL SOFTWARE VENSIM EN EL CANTON PUJILI PROVINCIA DE COTOPAXI PERIODO 2022 - 2023.”, ha considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de sustentación del trabajo de titulación.

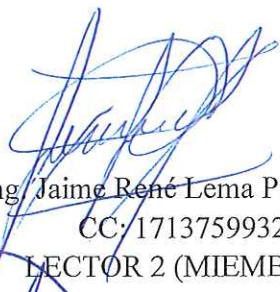
Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga, 26 de febrero de 2024

Para constancia firman:



Rodolfo Matius Mendoza Poma  
CC: 1710448521  
LECTOR 1(PRESIDENTE)



Ing/ Jaime René Lema Pillalaza, Mg  
CC: 1713759932  
LECTOR 2 (MIEMBRO)



Ing. Vladimir Marconi Ortiz Bustamante, Mg  
LECTOR 3 (MIEMBRO)  
CC: 0502188451

## **DEDICATORIA**

*A todos aquellos que han sido una parte integral de mi camino académico y personal. A mis padres, por su amor incondicional y por creer en mí desde el primer día. Por sus sacrificios y su apoyo constante que han sido la clave de mi éxito. A mis profesores y mentores, por su dedicación y pasión por la enseñanza y por guiarme en mi camino. A mis compañeros, por las risas y el estudio. Por las conversaciones estimulantes, y los momentos que compartimos juntos. A mi querida Alma Mater y a todas las personas que la conforman les agradezco de todo corazón. No podría haber llegado hasta aquí sin su apoyo*

*Vallejo Santamaría José Hernán*

## **AGRADECIMIENTO**

*En primer lugar, les agradezco a mis padres que siempre me han brindado su apoyo incondicional para poder cumplir todos mis objetivos personales y académicos. Ellos son los que con su cariño me han impulsado siempre a perseguir mis metas y nunca abandonarlas frente a las adversidades. También son los que me han brindado el soporte material y económico para poder concentrarme en los estudios y nunca abandonarlos. También a los docentes que han sido parte de mi camino universitario, y a todos ellos les quiero agradecer por transmitirme los conocimientos necesarios para hoy poder estar aquí. Sin ustedes los conceptos serían solo palabras. Por último, agradecer a la Universidad que me ha exigido tanto, pero al mismo tiempo me ha permitido obtener mi tan ansiado título. Agradezco a cada directivo por su trabajo y por su gestión, sin lo cual no estarían las bases ni las condiciones para aprender conocimientos*

*Vallejo Santamaría José Hernán*



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS**  
**NATURALES**

**TÍTULO: “EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS APLICANDO SISTEMAS DINÁMICOS CON EL SOFTWARE VENSIM EN EL CANTON PUJILI PROVINCIA DE COTOPAXI PERIODO 2022 - 2023.”**

**AUTOR:**

Vallejo Santamaría José Hernán

**RESUMEN**

El presente informe investigativo tuvo el objetivo de hacer un análisis dinámico del Sistema de Gestión Integral de desechos del Cantón Pujilí mediante la herramienta Vensim. Para lo cual, se realizó un análisis de variables que participan en el proceso de administración de los desechos comunes del Cantón, determinando una de las variables principales como separación en la fuente que viene en función del crecimiento poblacional; la actividad de reciclaje, aprovechamiento de orgánicos, capacidad del relleno sanitario, y su disposición final, estableciéndose la metodología para la determinación del desempeño del sistema de gestión de residuos sólidos actual a través de la simulación del sistema con el software Vensim, citado anteriormente; donde, se analizó el desempeño actual del sistema contra cuatro casos hipotéticos establecidos en el plan de mejoras del GAD municipal. Por medio de la modalidad cualitativa y cuantitativa, ya que, los datos cuantitativos ayudaron a observar el panorama general, mientras que los datos cualitativos permitieron analizar los casos estudiados como son 20% más de separación en la fuente, 30% de revalorización de residuos y el enfoque final fue combinar los casos uno y dos considerando un aprovechamiento de residuos al 50%. Encontrando que con una proyección poblacional al 2023 mediante fórmula geométrica se vio un incremento del 20% de producción de residuos sólidos en el Cantón, En el primer escenario, para el año 2040 habría capacidad disponible para almacenar 9,245,700 toneladas de residuos, mientras que en el tercer escenario esa capacidad aumentaría a 13,123,000 toneladas. En cuanto al indicador de residuos aprovechados, en el tercer escenario se lograría un aprovechamiento constante del 42%, mientras que en el primer escenario se mantendría en un 37%, y en el segundo escenario se alcanzaría un aprovechamiento del 19%, lo que supone un aumento de 3 puntos porcentuales con respecto al escenario actual. Los resultados obtenidos permitieron establecer un plan de mejoras en la gestión integral del cantón de Pujilí, desde la decisión política que asigna presupuestos hasta la mejora del volumen del relleno sanitario, pasando por las fases de importancia según el reglamento al Código Orgánico de Ambiente (ReCOA) que son revalorización y separación en la fuente.

**Palabras clave:** sistemas dinámicos, residuos sólidos, relleno sanitario, gestión integral, reciclaje

**TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI**  
**FACULTY OF AGRICULTURAL SCIENCE AND NATURAL**  
**RESOURCES**

**TITLE: “ASSESSMENT OF THE COMPREHENSIVE SOLID WASTE MANAGEMENT SYSTEM USING DYNAMIC SYSTEMS WITH VENSIM SOFTWARE IN PUJILÍ CANTON, COTOPAXI PROVINCE, PERIOD 2022-2023”**

**AUTHOR:**

Vallejo Santamaría José Hernán

**ABSTRACT**

The present research report aimed to conduct a dynamic analysis of the Waste Management System of Pujilí Canton using the Vensim tool. To this end, an analysis of variables involved in the management process of the Canton's common waste was carried out, determining one of the main variables as source separation, which is dependent on population growth. Activities such as recycling, organic waste utilization, landfill capacity, and final disposal were analyzed, establishing the methodology for assessing the performance of the current solid waste management system through simulation with the aforementioned Vensim software. The current system's performance was compared against four hypothetical cases outlined in the municipal GAD improvement plan. Both qualitative and quantitative modalities were employed, with quantitative data providing an overview, while qualitative data allowed for the analysis of studied cases such as a 20% increase in source separation and a 30% waste revalorization. The final approach combined cases one and two, considering a 50% waste utilization rate. The projection of population growth up to 2023, using geometric formula, indicated a 20% increase in solid waste production in the Canton. In the first scenario, by 2040, there would be available capacity to store 9,245,700 tons of waste, while in the third scenario, this capacity would increase to 13,123,000 tons. Regarding the waste utilization indicator, the third scenario would achieve a constant utilization rate of 42%, compared to 37% in the first scenario and 19% in the second scenario, representing a 3-percentage-point increase over the current scenario. The results obtained allowed for the establishment of an improvement plan in the comprehensive management of Pujilí Canton, ranging from political decisions allocating budgets to landfill volume improvement, adhering to the phases deemed important according to the regulations of the Organic Environmental Code (ReCOA), namely revalorization and source separation.

**Keywords:** dynamic systems, solid waste, landfill, comprehensive management, recycling

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

DECLARACIÓN DE AUTORÍA .....	ii
CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR ....	iii
AVAL DE LA TUTORA DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.....	v
AVAL DE LOS LECTORES DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN .....	vi
AGRADECIMIENTO .....	vii
DEDICATORIA.....	viii
RESUMEN.....	ix
ABSTRACT .....	x
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	xi
ÍNDICE DE TABLAS .....	xiv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xv
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xvii
1. INFORMACIÓN GENERAL .....	1
2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.....	2
3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.....	2
4. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO .....	3
5. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	3
6. OBJETIVOS .....	4

6.1. Objetivo General.....	4
6.2. Objetivos Específicos.....	4
7. ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN CON LOS OBJETIVOS PLANTEADOS.....	5
8. FUNDACIÓN CIENTÍFICA TÉCNICA.....	6
8.1. Residuo y/o desecho .....	6
8.1.1. Clasificación de los residuos.....	6
8.1.2. Contaminación por residuos.....	7
8.2. Relleno Sanitario .....	7
8.3. Sistema de Gestión Integral de Residuos Sólidos .....	9
8.3.1. Fases.....	9
8.3.2. SGIRS de la Mancomunidad Saquisilí y Pujilí.....	10
8.4. Dinámica de Sistemas .....	14
8.4.1. Sistema Dinámico.....	14
8.4.2. Modelo de simulación.....	14
8.4.3. Software Vensim .....	14
8.4.4. Estructura del Sistema .....	15
8.1.2 Validación de la dinámica de sistemas .....	18
8.2 Marco Normativo y Legal.....	18
8.5.1 Constitución de la República del Ecuador .....	18
8.5.2 Código Orgánico del Ambiente.....	19

8.5.3	Código Orgánico de Organización Territorial COOTAD .....	21
8.5.4	Acuerdo N°. 061 Reforma del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria.....	22
9	PREGUNTA CIENTÍFICA.....	24
10	DISEÑO METODOLÓGICO.....	25
10.1	Área de estudio .....	25
11	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	6
11.1	Caracterización del Sistema de Gestión Integral como Sistema dinámico para su posterior evaluación .....	7
12	IMPACTOS (ECONÓMICOS, SOCIALES Y AMBIENTALES).....	20
12.1	Económicos.....	20
12.2	Sociales.....	20
12.3	Ambientales .....	20
13	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	21
13.1	Conclusiones.....	21
13.2	Recomendaciones.....	22
14	BIBLIOGRAFÍA .....	23

## ÍNDICE DE TABLAS

**Tabla 1.** Actividades y sistema de tareas en relación con los objetivos planteados<sup>5</sup>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Relleno sanitario .....	8
Figura 2 Corte de un relleno sanitario.....	8
Figura 3 Fases de la Gestión Integral.....	10
Figura 4 Mancomunidades para la gestión integral de residuos sólidos.....	11
Figura 5 Procedimientos operativos .....	13
Figura 6 Software Vensim.....	14
Figura 7 Diagrama abierto.....	15
Figura 8 Bucle de retroalimentación positiva.....	16
Figura 9 Bucle de retroalimentación negativa.....	17
Figura 10 Tipos de variables .....	17
Figura 11 División Política y Densidades Poblacionales de la Provincia de Cotopaxi .....	25
Figura 12 División parroquial del cantón Pujilí .....	26
Figura 13 Referencias generales de la ubicación del Complejo Ambiental Mancomunado de Pujilí y Saquisilí.....	1
Figura 14. Diagrama de causas con las variables de estudio Sistema integral de gestión residuos sólidos.....	7
Figura 15. Diagrama de Flujo y Niveles Sistema Integral de Gestión de Residuos Sólidos Pujilí .....	9
Figura 3. Figura 16 Crecimiento demográfico Pujilí.....	11

Figura 17. Datos Gobierno Autónomo Descentralizado Pujilí contra datos Simulados.....	12
Figura 18 Comportamiento de la disposición final en diferentes escenarios. Fuente: Autores.....	12
Figura 19 Comportamiento de la capacidad del relleno sanitario en diferentes escenarios. Fuente: Autores.....	13
Figura 20 Comportamiento del indicador de residuos aprovechados en diferentes escenarios. Fuente: Autores.....	13
Figura 21. Comportamiento del indicador de residuos dispuestos en diferentes escenarios. Fuente: Autores.....	14



## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Relleno Sanitario.....	29
Anexo2. Rutas de recolección.....	29

## 1. INFORMACIÓN GENERAL

Título del proyecto:

Evaluación del sistema de gestión integral de residuos sólidos aplicando sistemas dinámicos con el software Vensim en el cantón Pujilí provincia de Cotopaxi periodo 2022 - 2023.

Tipo de proyecto:	Investigación
Fecha de inicio:	Enero 2023
Fecha de finalización:	Enero 2023
Lugar de ejecución:	Cotopaxi      Gobierno      Autónomo Descentralizado del cantón Pujilí, provincia de Cotopaxi, zona La matriz.
Unidad Académica que auspicia:	Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales (CAREN)
Carrera que auspicia:	Ingeniería en Medio Ambiente
Proyecto de investigación vinculado:	No aplica
Equipo de trabajo:	Tutor de Titulación: Mg. José Luis Ágreda Oña Estudiante: José Hernán Vallejo Santamaría.
Área de conocimiento:	Servicios/Higiene y Servicios de Salud Ocupacional/Saneamiento de la comunidad

<b>Línea de investigación:</b>	Energías Alternativas y Renovables, Eficiencia Energética y Protección Ambiental
<b>Sub líneas de investigación:</b>	Sostenibilidad Ambiental
<b>Línea de vinculación:</b>	Proyecto de Vinculación de Gestión de Patrimonio Hídrico y Residuos Junto al Pueblo

## **2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO**

La presente investigación está enfocada en la evaluación del actual Sistema de Gestión Integral de Residuos Sólidos en el cantón Pujilí, provincia de Cotopaxi, a través del uso y aplicación de sistemas dinámicos, que permitan identificar las variables que intervienen en las fases y etapas del sistema para establecer una mejora de la situación a nivel cantonal e incluso provincial.

De este modo, para lograr los propósitos del proyecto, se hace uso del software Vensim, el cual permite realizar simulaciones continuas al ser una herramienta de modelaje orientada a varias áreas y funciones.

## **3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO**

El Sistema de Gestión Integral de Residuos Sólidos (SGIRS) se refiere a el enfoque estratégico para la gestión sostenible de los residuos sólidos, abarcando la generación segregación, transferencia, clasificación, tratamiento, recuperación y eliminación de forma integrada, con énfasis en la maximización del uso de los recursos eficiencia (Ahmed, 2022).

Para el mes de enero de 2015 se formó la Mancomunidad para la Gestión Integral de Desechos Sólidos de los Cantones Pujilí – Saquisilí con el fin de crear un modelo técnico - operativo eficiente para el manejo integral de los residuos sólidos producidos por ambos cantones. De ese modo, se ha logrado la obra más

representativa del proyecto, la construcción y operación del complejo ambiental mancomunado (relleno sanitario) donde se realizan varios procedimientos como: tratamiento y aprovechamiento de residuos orgánicos, disposición final de residuos orgánicos posterior a la recolección y transporte de los mismos (GAD Cantón Pujilí, 2017).

Es imprescindible recalcar que la mala gestión del sistema de residuos sólidos genera contaminación como, por ejemplo, la producción de gases nocivos para las personas, y el medio ambiente. Los residuos inorgánicos que no son bien gestionados producen tóxicos, como en el caso de las pilas, y tienen un mayor consumo de energía (Vega Moreno, 2019).

Por último, es conveniente acotar que los modelos ambientales que se crean hoy en día, tienen como fin la predicción de comportamiento de un contaminante en el ambiente, lo cual es fundamental en la prevención de los efectos perjudiciales para el ecosistema, principalmente para los seres humanos y otros organismos vivos (Argentina Ambiental, 1996).

#### **4. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO**

##### **Beneficiarios Directos:**

Los beneficiarios directos son los habitantes del cantón Pujilí, siendo en total, según el Censo 2010, 69.055 habitantes, siendo 32.736, hombres y 36.319 son mujeres (GAD Cantón Pujilí, 2017).

##### **Beneficiarios Indirectos:**

Los beneficiarios indirectos son los habitantes de la provincia de Cotopaxi, siendo en total, según el Censo 2010, 409.205 habitantes (GAD Provincial de Cotopaxi, 2018).

#### **5. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

No solo la inadecuada gestión de los residuos sólidos sino el incremento de la población del cantón Pujilí, se han convertido en problemas ambientales de gran

envergadura principalmente para los sectores donde ausencia de cultura ambiental es evidente y rompe con el equilibrio dinámico y ecológico del medio ambiente (Cruz, 2020).

Los servicios de recolección de residuos sólidos en la provincia de Cotopaxi están destinados a las zonas urbanas principalmente, mientras que en las áreas rurales solo representa el 26 %, según datos del INEC. Esto significa que el 74% de la población no dispone del servicio, por lo que depositan directamente la basura es enterrada o depositada en las quebradas. El problema radica en que la disposición de desechos sólidos es realizada en botaderos no controlados, existiendo únicamente en la provincia un relleno sanitario localizado en el Cantón Salcedo (GAD Provincial de Cotopaxi, 2018).

En este sentido, el empleo de la metodología basada en la dinámica de sistemas ayuda entre otros aspectos, a establecer alternativas de solución de los desechos de manera sistémica (ver el todo, causas, efectos y consecuencias en el sistema en estudio) y contribuye a la toma de decisiones y planteamiento de estrategias más adecuadas para un manejo óptimo de los desechos sólidos, ayudando a que el comportamiento frente a este problema mencionado sea más eficiente por parte de los habitantes y de las autoridades (Mory, 2019).

## **6. OBJETIVOS**

### **6.1. Objetivo General**

Evaluar mediante sistemas dinámicos, el sistema de gestión integral del cantón Pujilí.

### **6.2. Objetivos Específicos**

- Caracterizar el sistema de gestión integral como sistema dinámico para su posterior evaluación.
- Definir variables del sistema dinámico.

En la tabla 1 se describe los objetivos con las actividades a realizar para la investigación, proponiendo metodologías para establecer los resultados necesarios para cumplir con el mérito de la investigación.

Tabla 1. Actividades y sistema de tareas en relación con los objetivos planteados

Objetivo	Actividad	Resultado	Medios de verificación
Caracterizar el sistema de gestión integral como sistema dinámico para su posterior evaluación.	<input type="checkbox"/> Investigación del actual Sistema de Gestión Integral de Residuos Sólidos de Pujilí desde el punto de vista dinámico	<input type="checkbox"/> Línea base del SGIRS en función del dinamismo.	<input type="checkbox"/> Bases teóricas y conceptuales. <input type="checkbox"/> Diseño dinámico del SGIRS.
Definir variables del sistema dinámico.	<input type="checkbox"/> Modelamiento del sistema a través de variables y flujos.	<input type="checkbox"/> Sistema dinámico en el software Vensim	<input type="checkbox"/> Simulaciones
Optimizar el sistema de gestión integral de residuos sólidos de cantón Pujilí mediante los resultados obtenidos en Vensim para mejorar la gestión de desechos.	<input type="checkbox"/> Elaboración de un plan de mejora del SGIRS del cantón Pujilí a través de los resultados previos.	<input type="checkbox"/> Propuesta de optimización	<input type="checkbox"/> Plan de mejora de la gestión de desechos en el cantón.

---

## 8. FUNDACIÓN CIENTÍFICA TÉCNICA

### 8.1. Residuo y/o desecho

Los residuos sólidos son sub productos de los procesos productivos, dicho esto, constituye cualquier materia resultante de la destrucción o descomposición de un material orgánico o inorgánico, que tenga condiciones para que se lo utilice en otro fin (SEMARNAT, 2018). Desecho, por otro lado, hace referencia a aquellos sobrantes o desperdicios que resultan de las actividades humanas (Salud Ambiental en la Escuela, 2023).

Bajo este contexto, se puede determinar que existe una diferencia entre residuo y desecho, donde el primer caso corresponde a aquel contenido que puede ser aprovechado nuevamente, mientras que el desecho forma parte de la basura, que ya ha cumplido su fase de utilidad (A1, 2023).

#### 8.1.1. Clasificación de los residuos

El Reglamento al Código Orgánico establece jerarquizaciones para la gestión de residuos sólidos. En ese sentido, dichos residuos sólidos pueden ser divididos en aprovechables y no aprovechables. Y dentro de ellos se pueden clasificar en:

##### 8.1.1.1 Residuos Peligrosos

Son desechos o residuos sólidos, líquidos, pastosos, o gaseosos generados a partir de una actividad de servicio o de producción, o a partir del consumo domiciliario, y que contienen características peligrosas como tóxicas, corrosivas, reactivas, inflamables, radioactivas o biológico infecciosas que suponen un riesgo para la salud humana y para el medio ambiente, según la normativa aplicable (Incinerox, 2019).

##### 8.1.1.2 Residuos No Peligrosos

Son aquellos que pueden ser aprovechados y que no ocasionan mayor impacto al medio ambiente. Este tipo de residuos pueden ser reciclados o son biodegradables,

siendo papeles, plásticos, vidrio, chatarra, madera, residuos alimenticios no contaminados, entre otros (Incinerox, 2019).

#### 8.1.1.3 Residuos Especiales

Este tipo de residuos son líquidos, pastosos o gaseosos peligrosos o no peligrosos que se han generado a partir de una actividad productiva, o domiciliaria, que requieren un régimen especial de gestión según la norma técnica aplicada por la Autoridad Ambiental Nacional (Incinerox, 2019).

#### 8.1.2. Contaminación por residuos

Este tipo de contaminación es uno de los problemas que más aquejan a las sociedades humanas y al medio ambiente, hoy en día, pues el consumismo y la ausencia de una gestión efectiva de los residuos provoca que cada vez los residuos se acumulen en forma de basura y no se reincorporen nuevamente al medio ambiente, principalmente aquellos que tienen las características de reusables y reciclables (Arriols, 2019). Es fundamental tener en cuenta el impacto negativo de la contaminación por basura tanto para la salud humana como para el resto de seres vivos, debido a las sustancias tóxicas que son liberadas al agua, al aire y al suelo (Arriols, 2019).

### 8.2. Relleno Sanitario

Un eje fundamental en saneamiento es el control de vectores infecciosos a través de un programa integral de gestión. Un vertedero o relleno sanitario es una gran superficie de terreno, normalmente revestida, que se utiliza para verter y eliminar material de desecho (Judd & Judd, 2006).



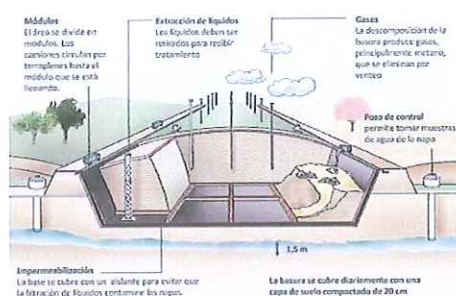
Figura 1 Relleno sanitario



Nota. Obtenido de (Pexels, 2022)

La selección del emplazamiento de un vertedero es una tarea extremadamente difícil, ya que depende de diversos factores y normativas. Cada vez es más difícil debido a la creciente concienciación medioambiental, la disminución de la financiación gubernamental y municipal y la extrema oposición política y social. El aumento de la densidad de población, los problemas de salud pública y la menor disponibilidad de terrenos para la construcción de vertederos son también dificultades que hay que superar (Şener et al., 2006). A continuación, se puede observar un corte de un relleno sanitario para reconocer su funcionamiento.

Figura 2 Corte de un relleno sanitario



Nota. Obtenido de (Torri, 2017)

### 8.3. Sistema de Gestión Integral de Residuos Sólidos

Cada Gobierno Autónomo tiene por responsabilidad y obligación gestar un ambiente sano para la colectividad, apoyado desde la carta magna y terminando

en las competencias locales, es por aquello que el sistema de Gestión Integral de Residuos Sólidos (GIRS) eficaz tiene en cuenta cómo prevenir, reciclar y gestionar los residuos sólidos de la manera más eficaz para proteger la salud humana y el medio ambiente. GIRS implica la evaluación de las necesidades y condiciones locales, y luego la selección y combinación de las actividades de gestión de residuos más apropiadas para esas condiciones. Las principales actividades de GIRS son la prevención de residuos, el reciclaje y compostaje, y la combustión y eliminación en vertederos adecuadamente diseñados, construidos y gestionados. Cada una de estas actividades requiere una cuidadosa planificación, financiación, recogida y transporte, aspectos todos ellos que se tratan en ésta y en las demás fichas informativas (Climate and Clean Air Coalition CCAC, 2023).

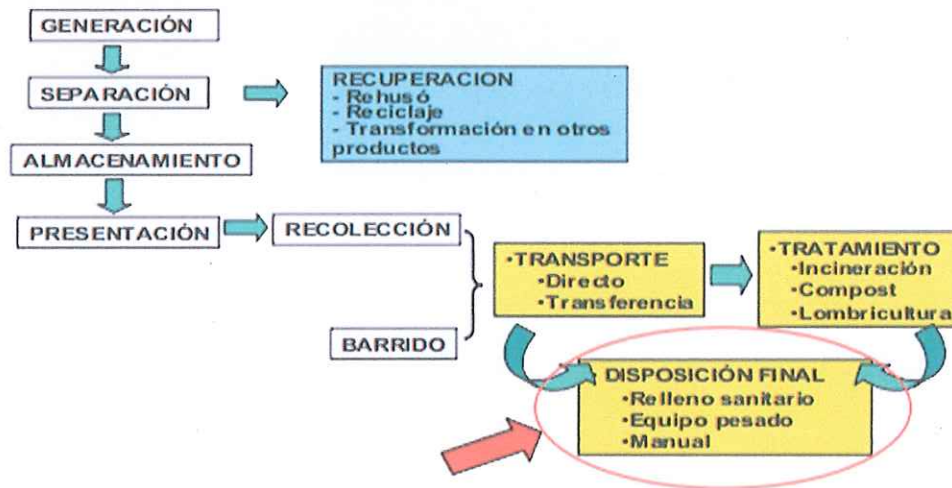
Las inmensas exigencias financieras, tecnológicas y de capacidad de gestionar los residuos sólidos hacen que la gestión adecuada de los (RSU) se convierta en un reto importante para muchas ciudades. Este reto se complica por una serie de estresores externos. Por ejemplo, el crecimiento económico conlleva un aumento del consumo y de la generación de residuos. Además, el crecimiento económico a menudo conduce al consumo de nuevos tipos de bienes, como los aparatos electrónicos, que son difíciles de reciclar. El crecimiento demográfico también conlleva un aumento de la generación de residuos. Además, este crecimiento suele producirse en zonas densamente pobladas de las ciudades, lo que puede agravar las dificultades para recoger los residuos (Environmental Protection Agency, 2023).

### 8.3.1. Fases del Sistema de Gestión Integral de Residuos Sólidos

Las actividades que se asocian comúnmente a la GIRS son aquellas de control 1. Durante la generación, 2. Separación, 3. Almacenamiento, 4. Prestación, 5. Recolección pública, 6. Barrido, 7. Transporte, 8. Tratamiento, 9. Disposición Final (SEMARNAT, 2018). En comparación al Reglamento al COA en su artículo 615, que se establece como fases principales la generación, almacenamiento, transporte,

eliminación y disposición final, se puede establecer que principalmente los métodos de revalorización no están considerados en la reglamentación nacional. Las fases están establecidas en la figura 3.

Figura 3 Fases de la Gestión Integral

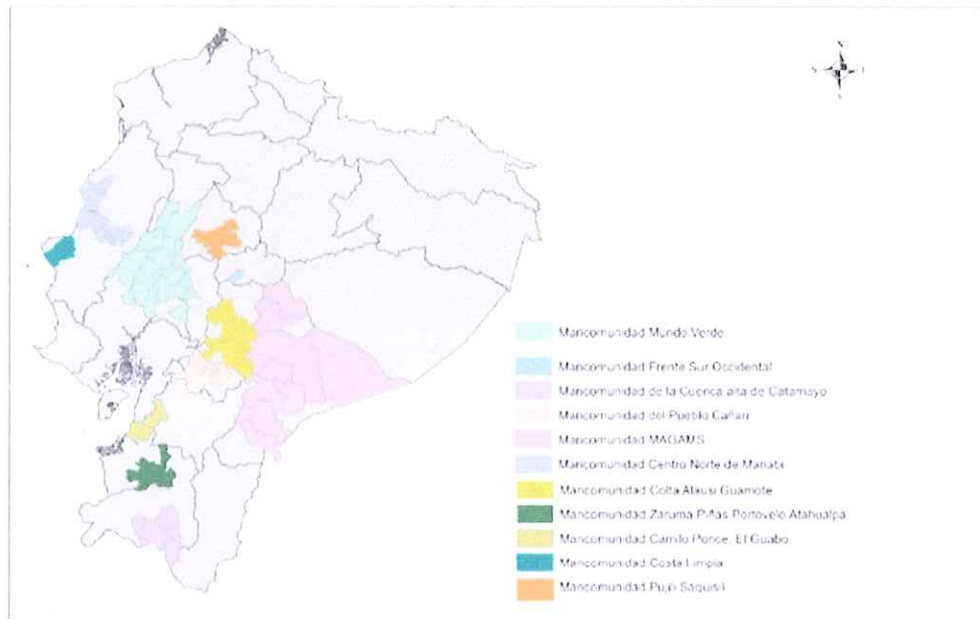


Nota. Obtenido de (SEMARNAT, 2018)

### 8.3.2. Sistema de Gestión Integral de residuos Sólidos de la Mancomunidad Saquisilí y Pujilí

En el Ecuador se reconocen 11 mancomunidades para la gestión integral de residuos sólidos, que tal como se estipula en el Art. 137 del COOTAD, son los GAD Municipales y Metropolitanos quienes han ejercido dicha competencia durante años, para lo cual se han formado mancomunidades para su gestión (Consejo Nacional de Competencias, 2018).

Figura 4 Mancomunidades para la gestión integral de residuos sólidos



Nota. Obtenido de (Consejo Nacional de Competencias, 2018)

El Sistema de Gestión Integral para el manejo mancomunado de los residuos sólidos de la Mancomunidad del Río Cutuchi, está conformado por los GAD municipales tanto del cantón Pujilí como Saquisilí (Castillo, n.d.).

#### 8.1.1.4 Aprovechamiento del Sistema Existente

En el caso del Cantón Pujilí, se tienen dos recolectores en buen estado marca Mercedes Benz de años 2011 y 2012, así como un recolector año 2012 marca Chevrolet. También, cuentan con una volqueta de 4 m<sup>3</sup> marca Chevrolet del año 2012. Los vehículos indicados serán reutilizados hasta que cumplan una vida útil de 8 años y en la programación de inversiones son reemplazados. En cuanto se refiere a Saquisilí, se continúan utilizando el recolector HINO 2011 y la volqueta HINO 2009, que sirven actualmente para la recolección. Al igual que para Pujilí se realiza la programación año a año de la reposición de los equipos (Castillo, n.d.).

En cuanto a papeleras en los dos cantones, se reutilizan la mayoría de papeleras existente, reemplazándose aquellas que se encuentran en mal estado, para lo cual

se ha considerado 20 papeleras adicionales. Para la disposición final de los residuos sólidos, para la fase de transición hacia el nuevo relleno sanitario mancomunado,

se ha previsto la implantación de una celda emergente mancomunada a ubicarse junto al cierre técnico del botadero de Pujilí (Castillo, n.d.).

Las instalaciones de cada GAD donde funciona los Departamentos encargados de los servicios actualmente, seguirán operativos dando el soporte logístico al sistema, hasta que entre en funcionamiento el nuevo modelo de gestión, mismo que parte de la perspectiva de una nueva propuesta tarifaria busca la sostenibilidad financiera del servicio en todos sus componentes (Castillo, n.d.).

#### 8.1.1.5 Identificación de las normas y procedimientos de diseño

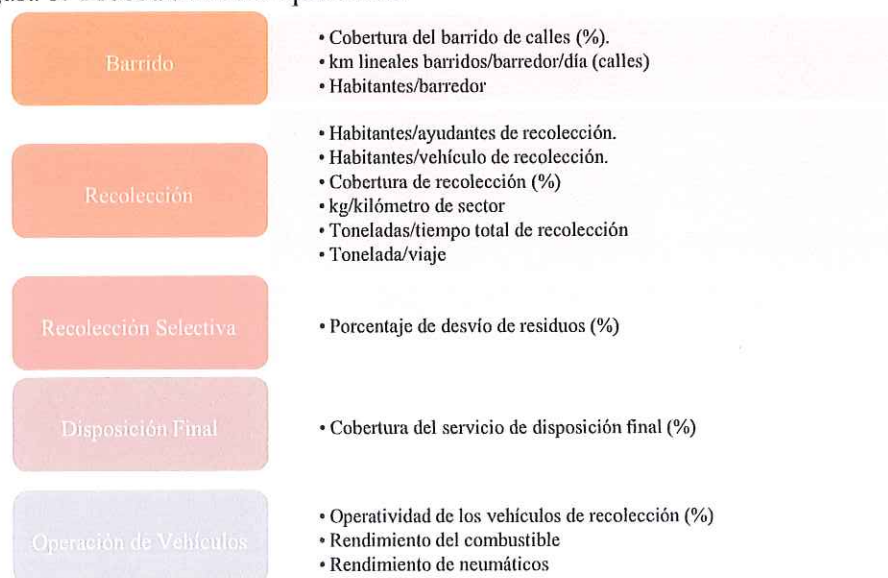
A nivel nacional las normas para aspectos operativos de los sistemas de aseo vienen dados tanto por las siguientes normas:

- Acuerdo Ministerial No. 068, del MAE, que reforma el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Libro VI, Título 1, del Sistema Único de Manejo Ambiental (SUMA) – TULSMA;
- Acuerdo Ministerial No. 006 del MAE que reforma el Acuerdo Ministerial 068;
- Norma de Calidad Ambiental para el Manejo y Disposición Final de Desechos Sólidos No Peligrosos, Libro VI, Anexo 6, del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente, Decreto 3516, Tomo 1;
- Acuerdo Ministerial No 031, del MAE, que reforma el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente del Libro VI; Anexo 6, proceso de Relleno Sanitario y saneamiento de Relleno Sanitarios de los desechos sólidos y viabilidad técnica;
- Acuerdo Ministerial No 052, del MAE, que reforma el Acuerdo Ministerial No 031, del MAE, sobre el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente del Libro VI; Anexo 6, proceso

de Relleno Sanitario y saneamiento de Relleno Sanitarios de los desechos sólidos y viabilidad técnica (Castillo, n.d.).

Para el caso de los aspectos operativos, no existen normas nacionales que describan indicadores de eficiencia de los servicios de recolección y barrido, por lo que se ha tomado como referencia el documento de la OPS, titulado “Indicadores para el Gerenciamiento del Servicio de Limpieza Pública de: Ing. Fernando Paraguassú de Sá y Carmen Rojas Rodríguez, 2002”, mismos que se describen a continuación:

Figura 5. Procedimientos operativos



Nota. Adaptado de (Castillo, n.d.).

#### 8.1.1.6 Almacenamiento temporal

Dado que el almacenamiento temporal, va íntimamente ligado al sistema de recolección de residuos, el sistema diferenciado escogido para el almacenamiento en la fuente y de recolección, es el denominado “Modelo Loja” (Denominado así porque fue la primera ciudad del país en implementar este tipo de separación), que consiste en la siguiente forma de almacenamiento:

- Recipiente verde: orgánicos;
- Recipiente negro: inorgánicos (Castillo, n.d.).

Es decir, cada unidad habitacional o familiar cuenta con dos recipientes (o tachos) para separar al interior del domicilio en cada uno de ellos tanto los residuos de carácter orgánico, y aquellos de diferentes a los primeros, conocidos para este efecto como inorgánicos (Castillo, n.d.).

#### 8.4. Dinámica de Sistemas

La dinámica de sistemas corresponde a una metodología que se basa en el pensamiento sistémico con el fin de tratar situaciones complejas mediante la observación del todo y sus partes, lo que implica un análisis de las partes del sistema sin observar las relaciones entre ellas (De Leo et al., 2020).

##### 8.4.1. Sistema Dinámico

Un sistema dinámico es un modelo matemático de sistema que cambia con el tiempo. Este tipo de sistema se describe a través de una serie de variables, en donde el valor en un instante establece el estado del mismo; así como un conjunto determinístico de reglas determina un estado futuro, tomando como referencia lo actual (MathWorks, 2022).

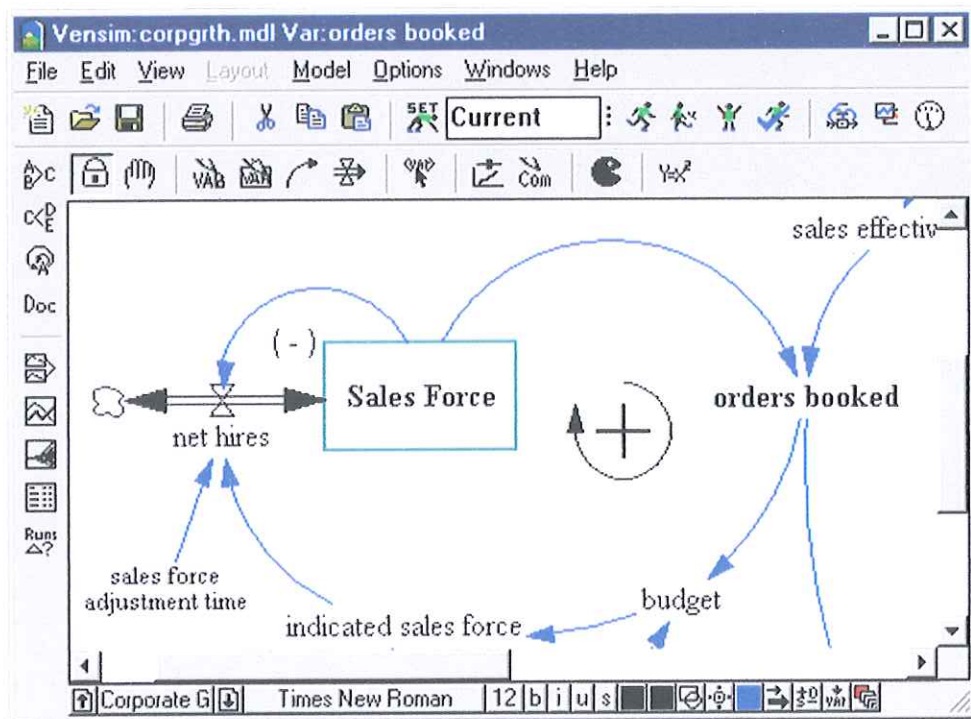
##### 8.4.2. Modelo de simulación

Un modelo de simulación es una representación de la realidad, el cual se lo utiliza para predecir cómo se comportan las variables de un sistema bajo ciertos escenarios. Gracias a esto, se puede ahorrar tiempo y dinero al momento de tomar decisiones, debido a que mediante un entorno computacional se plasma la realidad (Notus, 2022).

##### 8.4.3. Software Vensim

Vensim es una herramienta visual de modelaje encargada de conceptualizar, documentar, analizar, simular y optimizar modelos de dinámica de sistemas. Este software otorga una manera flexible y simple de construir modelos de simulación, en base a diagramas de flujo o de stock y de lazos causales (Software Shop, 2022).

Figura 6 Software Vensim



Nota. Obtenido de (Software Shop, 2022)

#### 8.4.4. Estructura del Sistema

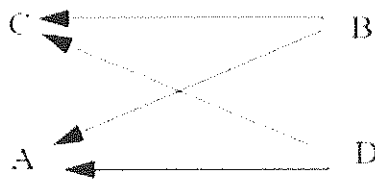
El sistema dinámico está integrado por los siguientes componentes:

##### 8.1.1.7 Diagramas causales o de influencias

Es el diagrama que establece un bosquejo esquemático de los elementos relacionados entre sí, al cual se los une entre sí por medio de flechas, que representan las aristas en donde se asocia un signo, de influencia positiva (+) o negativa (-) lo que indica una relación directa o inversa. Estos pueden ser diagramas abiertos (estructura simple) o cerrados (estructura compleja o bucles de realimentación) (De Leo et al., 2020).



Figura 7. Diagrama abierto



Nota. Obtenido de (De Leo et al., 2020)

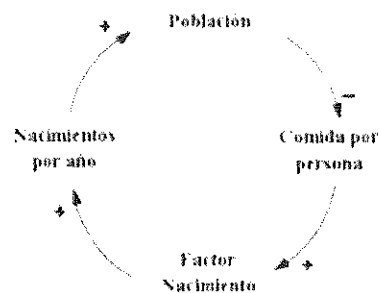
#### 8.1.1.8 Bucle de retroalimentación

Corresponde a los diagramas causales complejos, en donde se evidencia una cadena cerrada de relaciones causales, interactuando en conjunto bucles de retroalimentación positiva y negativa, los cuales determinan el comportamiento del sistema (De Leo et al., 2020).

##### 8.1.1.8.1 Bucle de retroalimentación positiva

La variación de un elemento es propagada a lo largo del bucle de forma que se refuerza la variación inicial. Un bucle de este tipo se caracteriza por contener un par de relaciones negativas (De Leo et al., 2020).

Figura 8 Bucle de retroalimentación positiva



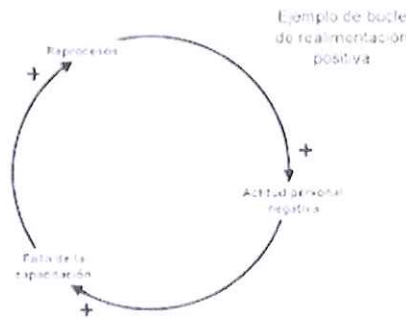
Nota. Obtenido de (De Leo et al., 2020)

##### 8.1.1.8.2 Bucle de retroalimentación negativa

Es aquel en el que la variación de un elemento es transmitida a lo largo del bucle, caracterizado por una acción auto correctora. Un bucle de tipo negativo tiende a

la creación de equilibrio, y se lo considera así porque mantiene un número impar de relaciones negativas (De Leo et al., 2020).

Figura 9 Bucle de retroalimentación negativa

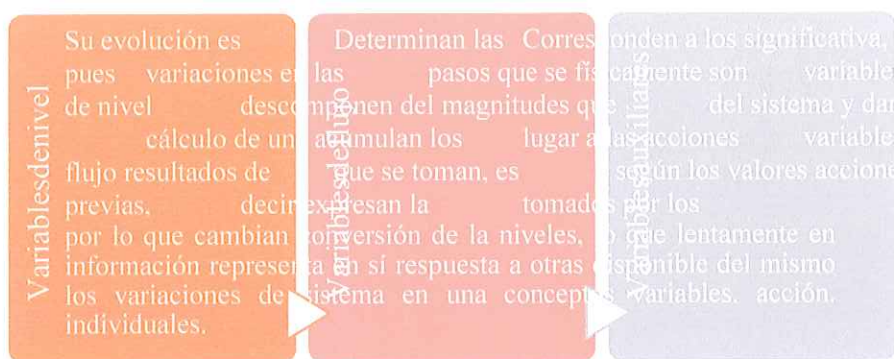


Nota. Obtenido de (De Leo et al., 2020)

### 8.1.1.9 Diagrama de Forrester

Consiste en una representación simbólica de las variables de flujo, de nivel y auxiliares de un diagrama causal, constituyendo un paso intermedio entre el sistema de ecuaciones diferenciales de primer orden que le corresponde y el diagrama causal (De Leo et al., 2020). Los elementos principales son:

Figura 10 Tipos de variables



Nota. Adaptado de (De Leo et al., 2020)

Otros elementos son las fuentes y sumideros, canales de material e información, retrasos, ecuaciones diferenciales, entre otros (De Leo et al., 2020).

### 8.1.2 Validación de la dinámica de sistemas

Según los investigadores Forrester y Senge en 1979, se determinaron 17 test para evaluar la estructura y comportamiento de un modelo dinámico (Quizhpi & SichiQui, 2019). De ese modo, con el fin de generar confianza en el modelo, algunas de las técnicas más utilizadas son la adecuación de límites, verificación de la estructura, consistencia dimensional, verificación de parámetros, condiciones extremas, consistencia dimensional, pruebas de integración de error, entre otras (Valencia & Obando, 2012).

## 8.2 Marco Normativo y Legal

### 8.5.1 Constitución de la República del Ecuador

Con respecto al Ambiente Sano, estipulado en la Sección Segunda, el Art. 14 menciona que:

Se reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, que garantice la sostenibilidad y el buen vivir, *sumak kawsay*.

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. (Constitución de la República del Ecuador, 2008, Art.14).

Y el Art. 15 que manifiesta lo siguiente:

El Estado promoverá, en el sector público y privado, el uso de tecnologías ambientalmente limpias y de energías alternativas no contaminantes y de bajo impacto. La soberanía energética no se alcanzará en detrimento de la soberanía alimentaria, ni afectará el derecho al agua.

Se prohíbe el desarrollo, producción, tenencia, comercialización, importación, transporte, almacenamiento y uso de armas químicas, biológicas y nucleares, de contaminantes orgánicos persistentes altamente tóxicos, agroquímicos internacionalmente prohibidos, y las tecnologías y agentes biológicos experimentales nocivos y organismos genéticamente modificados perjudiciales para la salud humana o que atenten contra la soberanía alimentaria o los ecosistemas, así como la introducción de residuos nucleares y desechos tóxicos al territorio nacional. (Constitución de la República del Ecuador, 2008, Art.15).

#### 8.5.2 Código Orgánico del Ambiente

Se establece en el Título V Gestión Integral de Residuos y Desechos varios Artículos de suma importancia, distribuidos en el Capítulo I - Disposiciones Generales y Capítulo II - Gestión Integral de Residuos y Desechos Sólidos No Peligrosos. Por lo que se tiene que el Art. 224 manifiesta que “La gestión integral de los residuos y desechos está sometida a la tutela estatal cuya finalidad es contribuir al desarrollo sostenible, a través de un conjunto de políticas intersectoriales y nacionales en todos los ámbitos de gestión, de conformidad con los principios y disposiciones del Sistema Unico de Manejo Ambiental” (Código Orgánico Del Ambiente, 2017, Art. 224).

El Art. 226 acerca del Principio de jerarquización, hace referencia a que:

La gestión de residuos y desechos deberá cumplir con la siguiente jerarquización en orden de prioridad:

1. Prevención;
2. Minimización de la generación en la fuente;
3. Aprovechamiento o valorización;
4. Eliminación; y,
5. Disposición final.

La disposición final se limitará a aquellos desechos que no se puedan aprovechar, tratar, valorizar o eliminar en condiciones ambientalmente adecuadas y tecnológicamente factibles.

La Autoridad Ambiental Nacional, así como los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales o Metropolitanos, promoverán y fomentarán en la ciudadanía, en el marco de sus competencias, la clasificación, reciclaje, y en general la gestión de residuos y desechos bajo este principio. (Código Orgánico Del Ambiente, 2017, Art. 226).

Por otro lado, el Art. 231 menciona que:

Serán responsables de la gestión integral de residuos sólidos no peligrosos a nivel nacional, los siguientes actores públicos y privados:

1. La Autoridad Ambiental Nacional como ente rector que dictará políticas y lineamientos para la gestión integral de residuos sólidos en el país y elaborará el respectivo plan nacional. Asimismo, se encargará de la regulación y control;
2. Los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales o Metropolitanos serán los responsables del manejo integral de residuos sólidos no peligrosos y desechos sanitarios generados en el área de su jurisdicción, por lo tanto están obligados a fomentar en los generadores alternativas de gestión, de acuerdo al principio de jerarquización, así como la investigación y desarrollo de tecnologías. Estos deberán establecer los procedimientos adecuados para barrido, recolección y transporte, almacenamiento temporal de ser el caso, acopio y transferencia, con enfoques de inclusión económica y social de sectores vulnerables. Deberán dar tratamiento y correcta disposición final de los desechos que no pueden ingresar nuevamente en un ciclo de vida productivo, implementando los mecanismos que permitan la trazabilidad de los mismos. Para

lo cual, podrán conformar mancomunidades y consorcios para ejercer esta responsabilidad de conformidad con la ley. Asimismo, serán responsables por el desempeño de las personas contratadas por ellos, para efectuar la gestión de residuos y desechos sólidos no peligrosos y sanitarios, en cualquiera de sus fases.

3. Los generadores de residuos, en base al principio de jerarquización, priorizarán la prevención y minimización de la generación de residuos sólidos no peligrosos, así como el adecuado manejo que incluye la separación, clasificación, reciclaje y almacenamiento temporal; en base a los lineamientos establecidos en la política nacional y normas técnicas.

4. Los gestores de residuos no peligrosos que prestan el servicio para su gestión en cualquiera de sus fases, serán responsables del correcto manejo, para lo cual deberán enmarcar sus acciones en los parámetros que defina la política nacional en el cuidado ambiental y de la salud pública, procurando maximizar el aprovechamiento de materiales. (Código Orgánico Del Ambiente, 2017, Art. 231).

### 8.5.3 Código Orgánico de Organización Territorial COOTAD

Con respecto a las mancomunidades y consorcios, se determina en el Art. 285, correspondiente a la Sección Tercera – Formas de Mancomunamiento, que:

Los gobiernos autónomos descentralizados regionales, provinciales, distritales, cantonales o parroquiales rurales y los de las circunscripciones territoriales indígenas, afroecuatorianas y montubias podrán formar mancomunidades entre sí, con la finalidad de mejorar la gestión de sus competencias y favorecer sus procesos de integración, en los términos establecidos en la Constitución y de conformidad con los procedimientos y requisitos establecidos en este Código.

Cuando el mancomunamiento se realice entre dos o más gobiernos autónomos descentralizados del mismo nivel de gobierno que no fueran contiguos o entre gobiernos autónomos descentralizados de distintos niveles se denominarán consorcios.

Las mancomunidades y consorcios que se constituyan podrán recibir financiamiento del presupuesto general del Estado para la obra o proyecto objeto del mancomunamiento, en función de la importancia de la obra o proyecto, previa aprobación por parte del gobierno central (Código Orgánico de Organización Territorial COOTAD, 2010, Art. 285).

#### 8.5.4 Acuerdo N°. 061 Reforma del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria

En el Capítulo VI Gestión Integral de Residuos Sólidos No Peligrosos, y Desechos Peligrosos y/o Especiales, se establecen las políticas generales de la gestión integral de los residuos sólidos no peligrosos, desechos peligrosos y/o especiales, en el Art. 49, en donde:

Se establecen como políticas generales para la gestión integral de estos residuos y/o desechos y son de obligatorio cumplimiento tanto para las instituciones del Estado, en sus distintos niveles de gobierno, como para las personas naturales o jurídicas públicas o privadas, comunitarias o mixtas, nacionales o extranjeras, las siguientes:

- a) Manejo integral de residuos y/o desechos;
- b) Responsabilidad extendida del productor y/o importador;
- c) Minimización de generación de residuos y/o desechos;
- d) Minimización de riesgos sanitarios y ambientales;
- e) Fortalecimiento de la educación ambiental, la participación ciudadana y una mayor conciencia en relación con el manejo de los residuos y/o desechos;

- f) Fomento al desarrollo del aprovechamiento y valorización de los residuos y/o desechos, considerándolos un bien económico, mediante el establecimiento de herramientas de aplicación como el principio de jerarquización:
- 1) Prevención
  - 2) Minimización de la generación en la fuente
  - 3) Clasificación
  - 4) Aprovechamiento y/o valorización, incluye el reuso y reciclaje
  - 5) Tratamiento y
  - 6) Disposición Final.
- g) Fomento a la investigación y uso de tecnologías que minimicen los impactos al ambiente y la salud;
- h) Aplicación del principio de prevención, precautorio, responsabilidad compartida, internalización de costos, derecho a la información, participación ciudadana e inclusión económica y social, con reconocimientos a través de incentivos, en los casos que aplique;
- i) Fomento al establecimiento de estándares mínimos para el manejo de residuos y/o desechos en las etapas de generación, almacenamiento temporal, recolección, transporte, aprovechamiento, tratamiento y disposición final;
- j) Sistematización y difusión del conocimiento e información, relacionados con los residuos y/o desechos entre todos los sectores;
- k) Aquellas que determine la Autoridad Ambiental Nacional a través de la norma técnica correspondiente. (Acuerdo No 61 Reforma Del Libro VI Del Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015, Art. 49).

Además, el Art. 55 De la gestión integral de residuos y/o desechos sólidos no peligrosos correspondiente a la Sección I Gestión Integral de Residuos y/o Desechos Sólidos No Peligrosos, hace mención que:



La gestión integral constituye el conjunto de acciones y disposiciones regulatorias, operativas, económicas, financieras, administrativas, educativas, de planificación, monitoreo y evaluación, que tienen la finalidad de dar a los residuos sólidos no peligrosos el destino más adecuado desde el punto de vista técnico, ambiental y socio-económico, de acuerdo con sus características, volumen, procedencia, costos de tratamiento, posibilidades de recuperación y aprovechamiento, comercialización o finalmente su disposición final. Está dirigida a la implementación de las fases de manejo de los residuos sólidos que son la minimización de su generación, separación en la fuente, almacenamiento, recolección, transporte, acopio y/o transferencia, tratamiento, aprovechamiento y disposición final.

Una gestión apropiada de residuos contribuye a la disminución de los impactos ambientales asociados a cada una de las etapas de manejo de éstos. (Acuerdo No 61 Reforma Del Libro VI Del Texto Unificado de Legislación Secundaria, 2015, Art. 49).

## 9 PREGUNTA CIENTÍFICA

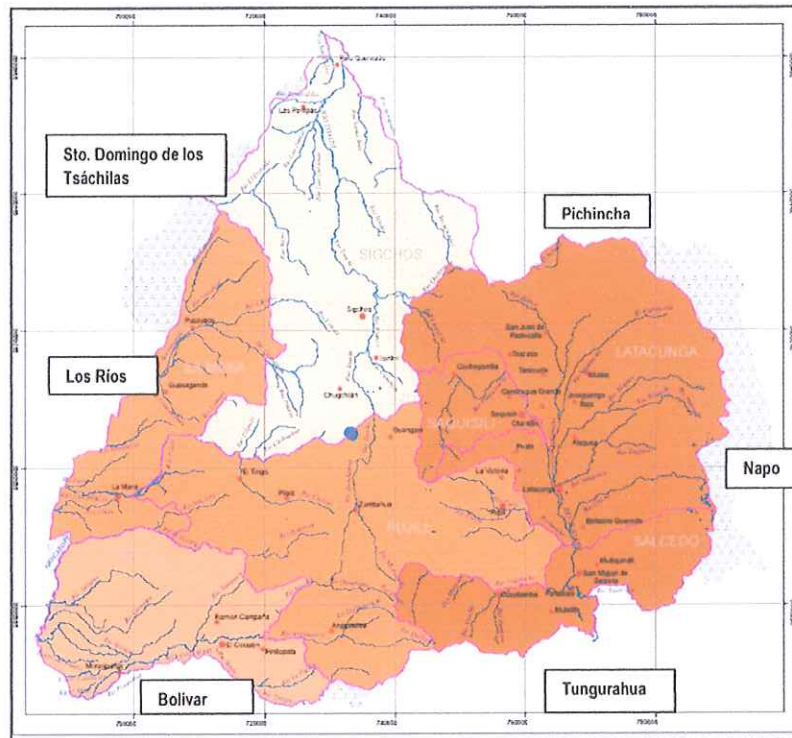
¿Se puede optimizar el sistema de gestión integral de residuos sólidos en el cantón Pujilí provincia de Cotopaxi, mediante la aplicación de sistemas dinámicos con el software Vensim?

## 10 DISEÑO METODOLÓGICO

### 10.1 Área de estudio

El cantón Pujilí fue creado el 14 de octubre de 1852, abarca una extensión territorial de 1289 Km<sup>2</sup> y se encuentra en un rango altitudinal, alto de 4 560 m y bajo de 240 m. En base al censo del año 2010 realizado por el INEC, Pujilí tiene una población de 69 055 habitantes (GAD Pujilí, 2022).

Figura 11 División Política y Densidades Poblacionales de la Provincia de Cotopaxi



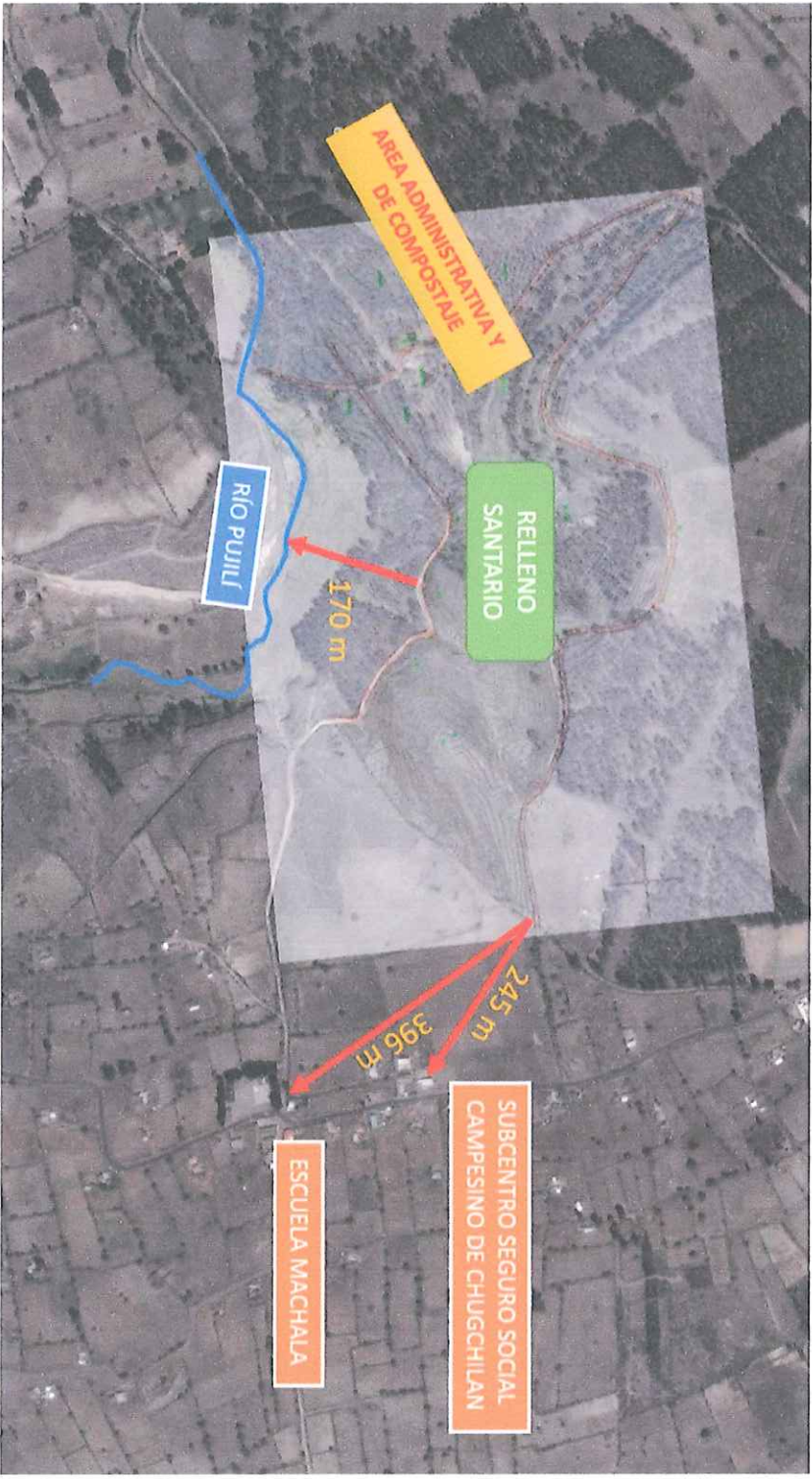
Nota. Digitalización Cartográfica base IGM 1: 50.000. Convenio ECOCIENCIA – HGPC. Obtenido de (GAD Cotopaxi, 2018)

El cantón Pujilí localizado en la zona Centro Occidental de la Provincia de Cotopaxi, a 10 km. al Oeste de la ciudad de Latacunga en la región interandina del Ecuador; se encuentra dividido en siete parroquias: Guangaje, La Victoria, El Tingo, Zumbahua, Angamarca, Pilaló y su cabecera cantonal, Pujilí. La topografía de la región es irregular con una altura promedio de 2980 m.s.n.m. Además, el clima

del cantón es semiárido meso termal con una temperatura media de  $12,4^{\circ}\text{C}$  (Soria, 2021). Los límites de Pujilí son, al Norte, los cantones Saquisilí, Sigchos y Latacunga; al Sur: Pangua, y la provincia del Tungurahua; al Este: Latacunga, Saquisilí y Salcedo; y al Oeste, Pangua y La Mana (GAD Pujilí, 2022).



Figura 1.3 Referencias generales de la ubicación del Complejo Ambiental Mancomunado de Pujilí y Saquisilí



Nota. Elaborado por autor propio.

## 10.2 Enfoque de la investigación

El enfoque de la investigación es de tipo “cuantitativa” debido a que se hace uso de datos de tipo numérico, tal como menciona Hernández Sampieri & Mendoza Torres (2018), quienes hacen alusión a que este tipo de investigación hace el uso de experimentaciones, llevando a cabo un proceso de causa – efecto, de este modo se emplea una perspectiva objetiva para encontrar los hallazgos. El sistema Vensim de análisis dinámico permite analizar y optimizar un sistema cualquiera; en este caso el sistema de gestión integral de desechos comunes del Cantón Pujilí, desde la toma de decisiones hasta la ejecución en territorio.

### 10.3.1 Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo “no experimental”, ya que se observan a los elementos en su ambiente natural para su posterior análisis y no se manipulan las variables deliberadamente (Hernández Sampieri & Mendoza Torres, 2018).

No obstante, desde otra tipificación de la investigación, se tiene lo plasmado por Méndez & Astudillo (2008) acerca de la investigación “primaria o de campo” y “secundaria o bibliográfica”. Para el presente caso de estudio, se hace uso de una investigación secundaria o bibliográfica, debido a que se obtienen datos mediante el descubrimiento, la sistematización, y el procesamiento de los mismos mediante conceptos, teorías y metodologías propias del estudio.

### 10.3.2 Diseño de investigación

La investigación tiene un diseño “corte transversal” ya que se realiza el estudio en un tiempo determinado, sin dar lugar a procesos a través del tiempo o en períodos largos y continuos de investigación (Hernández Sampieri & Mendoza Torres, 2018). Se consideró algunos escenarios importantes como un aumento del porcentaje de separación en la fuente, mejor aprovechamiento del los

residuos, escenario 1+2 y finalmente optimizar el sistema en 55% de aprovechamiento mas un aumento de separación en la fuente.

### 10.3.3 Alcance de la investigación

El alcance de investigación, según lo expuesto por Hernández Sampieri & Mendoza Torres (2018), es “exploratorio” ya que el tema de estudio ha sido poco explorado y representa algo innovador; así como “descriptivo” debido a que presenta las características o singularidades de un objeto de estudio.

### 10.4 Análisis de datos

La metodología comprendió principalmente tres fases fundamentales: una revisión bibliográfica a nivel internacional, la contextualización de la información para el modelado del problema en el Cantón Pujilí y el modelado mediante la utilización de Dinámica de Sistemas.

En la revisión bibliográfica internacional, se recopilaron datos y resultados de investigaciones similares a la presente propuesta, enfocadas en el modelado para la gestión de residuos. Se encontró, por ejemplo, un modelo de gestión de residuos para Bangkok, Tailandia, que propuso distintos escenarios de separación en la fuente, logrando cambios significativos en la vida útil del Relleno Sanitario después de cuatro años (Sukholthaman y Sharp, 2016).

Zanjani, Kiani, Saeedi y Vosoogh (2012) plantearon un modelo para la gestión de residuos en Teherán, Irán, incluyendo variables económicas y políticas, lo que les permitió llegar a conclusiones específicas, como la importancia de la planeación adecuada, la aplicación de políticas públicas y la participación constante de la sociedad.

Similarmente, Sufian y Bala (2007) modelaron la gestión de residuos sólidos en Daca, Bangladesh, concluyendo que la generación de energía a partir de residuos es una estrategia efectiva para mitigar impactos ambientales. Se encontraron también investigaciones específicas, como el modelo para la gestión de residuos

orgánicos en Quebec, Canadá (Hénault-Ethier, Martin y Housset, 2017), y el modelo para residuos de construcción en China (Ding, Yi, Tam y Huangl, 2016).

En cuanto a la contextualización de la información para el modelado del problema en Pujilí, se consultaron artículos como el de Sáez y Urdaneta (2014), que realizaron una revisión bibliográfica sobre la gestión de residuos sólidos en algunos países de América Latina y el Caribe. Porras (2018) relacionó el aumento poblacional en Chía con la generación creciente de residuos sólidos y propuso planes de acción para mejorar el sistema de gestión.

Además de investigaciones similares, se recopilaron datos cuantitativos para la modelación, consultando el Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) de 2016 obtenido mediante un derecho de petición a la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos (UAESP). Este documento proporcionó información relevante, como la cantidad de residuos en el Relleno Sanitario, su vida útil, aprovechamiento, frecuencias de recolección, caracterización de residuos, papel de recicladores, prestadores y operadores del servicio público de aseo, así como proyecciones demográficas y económicas.

También se consultaron fuentes como el INEC para datos demográficos, el Ministerio de Ambiente Agua y Transición Ecológica para la implementación de indicadores del Índice de Calidad Ambiental Urbana.

La revisión bibliográfica se realizó mediante un análisis de contenido, interpretando, comparando, ordenando y priorizando la información obtenida según año e importancia, para generar resultados que reflejaran de manera cercana la realidad.

10.4.1 Modelamiento del Sistema de Gestión Integral Pujilí, Considerando la información y los datos recopilados, se determinaron las variables más cruciales para el estudio, tales como población, recolección, disposición final, aprovechamiento de residuos orgánicos y reciclaje. Estas variables fueron seleccionadas debido a su presencia común en los modelos estudiados y a su

importancia en la gestión de residuos sólidos en la ciudad. Se llevó a cabo un análisis histórico de estos aspectos, examinando su comportamiento en los últimos años para establecer tendencias pasadas y proyectar posibles tendencias futuras, las cuales serán validadas a través del modelo.

La Dinámica de Sistemas, desarrollada por Forrester en el MIT, se conceptualiza como una herramienta que ilustra cómo ciertos objetos, procesos o sistemas experimentan cambios a lo largo del tiempo (Forrester, 1999). En esta metodología, el concepto de sistema se considera fundamental, entendido como una unidad compuesta por diversos elementos que interactúan de manera coordinada para alcanzar un objetivo específico. La Dinámica de Sistemas facilita la comprensión de las relaciones entre las variables y permite visualizar las posibles consecuencias de la modificación de una sola de ellas (Aracil, 1995; Sukholthaman y Sharp, 2016).

En el contexto de la Dinámica de Sistemas, cobra importancia la construcción de estructuras de realimentación, las cuales se definen como representaciones formales de los factores más significativos de un problema y sus interrelaciones (Zanjani, Kiani, Saeedi y Vosoogh, 2012; Ibarra y Redondo, 2015).

Después de la conceptualización e identificación del problema, la Dinámica de Sistemas se orienta hacia la formulación y evaluación del mismo. La formulación implica la creación de un diagrama de niveles y flujos mediante un software específico, mientras que la evaluación consiste en demostrar el comportamiento de las variables, ajustarlas a la realidad y modelar diversos escenarios (Redondo et al., 2018).

#### 10.4.2 Variables que se utilizadas en Vensim para la Simulación de Sistemas Dinámicos.

Los sistemas dinámicos están priorizados en el uso de variables que se concatenan en diferentes procesos para ver su repercusión y efecto en los distintos procedimientos de un sistema; el ejemplo particular para la investigación es un



sistema dinámico de gestión de desechos para el cantón Pujilí, partiendo del crecimiento poblacional como causa directa en la problemática de la gestión y disposición final.

10.4.2.1 Definición de variables para el análisis del sistema dinámico en el diagrama de causales.

Para definir las variables a tenerse en cuenta se parte del ReCOA en su artículo 615, donde se establecen las diferentes fases del Sistema GIRS. La simulación tendrá un efecto a través del tiempo para ver el comportamiento de la variable con el tiempo.

- 1) Fase de Generación; en esta etapa se consideran las variables causales de los desechos generados percapita, clasificados por su origen; en esta fase tenemos población, generación de residuos intermedios, orgánicos y reciclables.
- 2) Fase de almacenamiento y transporte, se diagramaron las variables causales como la recolección de residuos y en su fase de reciclaje y revalorización las estaciones de transferencia como principales espacios para optimizar el GIRS.
- 3) Fases eliminación y disposición final se estableció como variable la capacidad del relleno sanitario, y residuos dispuestos en el relleno; adicional el aprovechamiento de orgánicos se dirige fundamentalmente a la eliminación.

Se explica la relación que mantienen las variables entre sí para el análisis causal previo a la mejora del con el software Vensim ®, estos parámetro se pueden observar en la tabla 2.

Tabla 2 Variables Gestión Integrada de Residuos

Variable	Importancia
Población	Crecimiento Neto de la población
Generación de Residuos	Relacionado directamente con la población.
Separación en la fuente	Ayuda a la disposición final y el aprovechamiento en la fuente.
Reciclaje	Ayuda a la disposición final y el aprovechamiento en la fuente.
Aprovechamiento de Orgánicos	
Capacidad del Relleno	En toneladas métricas
Residuos Dispuestos en el relleno Sanitario	Genera afectación en el espacio necesitado
Residuos Recolectados	Cantidad de residuos que entran al sistema
Disposición Final	Volumen en el relleno sanitario
Recolección de Residuos	
Nota: Variables consideradas en el proceso de Gestión Integrada de Residuos del Cantón Pujilí	

## 10 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

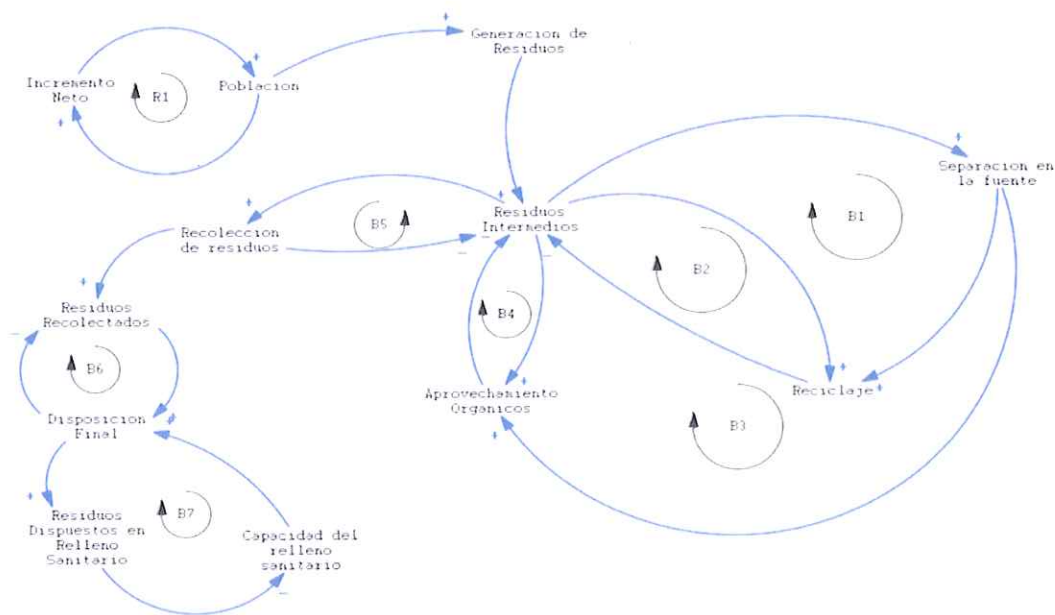
Los resultados se basaron en la discusión de cuatro escenarios propuestos en para el SIGRS, iniciando con un incremento del 30% de la separación en la fuente del total de residuos generados y recolectados. Segundo escenario se propuso un incremento del 30% de la revalorización de los residuos sólidos que llegan al SIGRS. Como tercer escenario se combinaron los escenarios 1 y 2 para poder verificar la mejora en SIGRS con estrategia principal de mitigación en la fuente y como dictamina el Re COA del país. Cuarto escenario se considera escenario 3 más

un aumento de aprovechamiento de residuos al 50%, generando resultados a través del modelamiento en Vensim para la optimización del SIGRS.

#### 11.1 Caracterización del Sistema de Gestión Integral como Sistema Dinámico

Siguiendo la metodología, la primera salida consistió en la creación del diagrama causal (ver Figura 1), que se origina a partir de la población. Elementos como los nacimientos, las defunciones, la migración y la inmigración inciden en la cantidad de habitantes en el cantón de Pujilí. No obstante, para simplificar estas interacciones, se emplea el concepto de incremento neto, que engloba las variables mencionadas anteriormente y, en conjunto, genera un impacto en la población. De esta manera, si hay un aumento neto positivo, la población experimentará un crecimiento; y a su vez, si la población aumenta, el incremento neto también se verá impulsado. Por ende, este bucle se caracteriza por ser de refuerzo.

Figura 14. Diagrama de causas con las variables de estudio Sistema integral de gestión residuos sólidos.



Nota: Se considera que todas las variables tienen procesos de incremento, menos residuos intermedios que es fundamental para los escenarios planteados

#### 11.1.2 Análisis del diagrama de causas

Si la cantidad de habitantes aumenta, se generará una mayor cantidad de residuos, específicamente más residuos intermedios, que se definen en el modelo como aquellos que surgen después de los procesos de aprovechamiento y se destinan a la disposición en el relleno sanitario. En este contexto, la implementación de diversas estrategias puede reducir estos residuos. Por ejemplo, un incremento en los residuos intermedios puede motivar una mayor separación en la fuente, lo que a su vez facilitará dos acciones: en primer lugar, más reciclaje y, como consecuencia, menos residuos intermedios (primer bucle de balance, generando otro entre residuos y reciclaje); en segundo lugar, un mayor aprovechamiento de material orgánico y menos residuos intermedios (tercer bucle de balance, generando otro entre residuos y aprovechamiento).

La disminución de los residuos intermedios también puede lograrse mediante la recolección, ya que estos pasan a ser considerados residuos recolectados, es decir, aquellos transportados en el vehículo recolector. Así, se establece el quinto bucle de balance, donde un aumento en los residuos acumulados implica una mayor

recolección, pero a su vez, una mayor recolección reduce la acumulación de residuos.

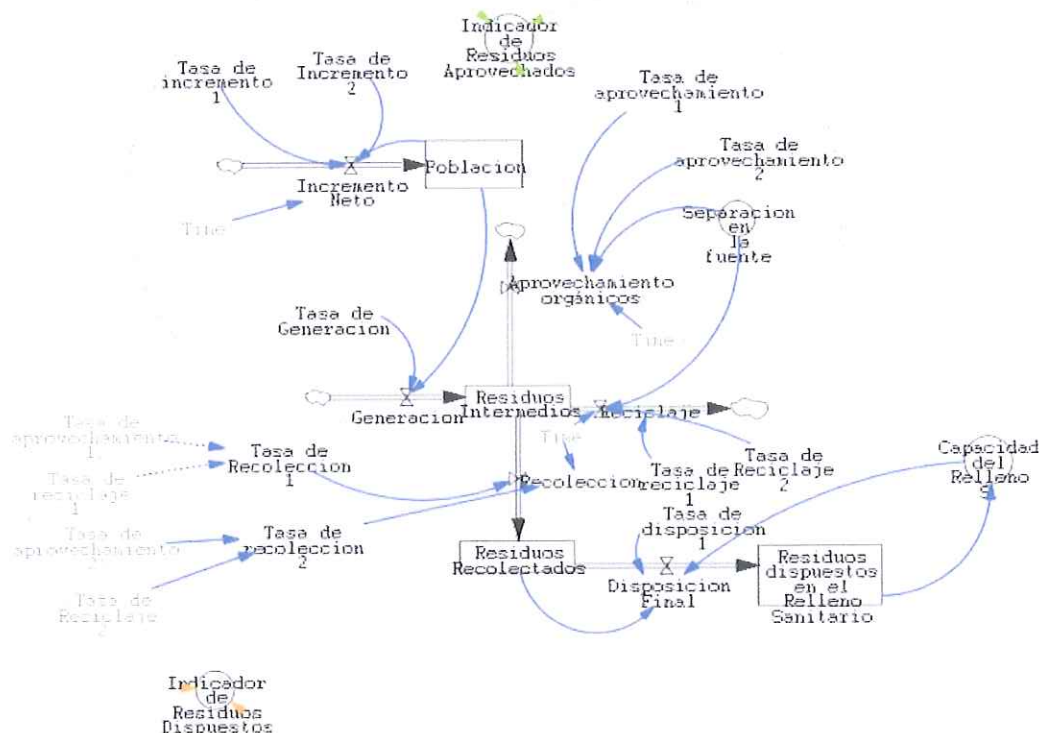
El proceso de recolección aumenta la cantidad de residuos recolectados, los cuales deben ser dispuestos. Esto se traduce en que a mayor cantidad de residuos recolectados, se requiere una mayor disposición final. Sin embargo, una mayor disposición final conlleva a una disminución de los residuos presentes en los vehículos, dando lugar al sexto bucle de balance.

Finalmente, si se lleva a cabo una mayor disposición final, la cantidad de residuos en el Relleno Sanitario aumentará, lo que resultará en una disminución de su capacidad. Al observar detenidamente este último aspecto, se evidencia que a menor capacidad del relleno, se podrá realizar una disposición final de residuos de manera más limitada, generando así el último bucle de balance.

## 11.2 Diseño dinámico del Sistema de gestión Integral de Residuos Sólidos

Después de la elaboración del diagrama causal, la conversión a un diagrama de niveles y flujos se llevó a cabo utilizando el software Vensim Ple, y el producto final se presenta en la figura 2. En este proceso, fue esencial establecer de manera apropiada las variables de nivel y auxiliares, así como los flujos de entrada y salida mostrados en la figura 15.

Figura 15. Diagrama de Flujo y Niveles Sistema Integral de Gestión de Residuos Sólidos Pujilí



### 11.2.1 Análisis del Sistema de Flujo

Para comenzar, en este esquema se llevó a cabo la conexión de los indicadores seleccionados del Índice de Calidad Ambiental Urbana (ICAU). Para realizar este paso de manera apropiada, se emplearon las ecuaciones 1 y 2 como guía; como se evidencia, estas ecuaciones incorporan las variables de residuos sólidos aprovechados, residuos sólidos generados y residuos sólidos dispuestos adecuadamente, las cuales están implícitas en el modelo.

$$\% \frac{\text{Residuos Aprovechados}}{\text{Residuos Generados}} \times 100 = \text{Ec. 1}$$

$$\% \frac{\text{Residuos Dispuestos}}{\text{Residuos Recoleccionados}} \times 100 = \text{Ec. 2}$$

Para concluir con la confección del diagrama de niveles y flujos, se desarrolló el modelo matemático mediante ecuaciones de nivel, flujo y auxiliares.

Posteriormente, se llevó a cabo el análisis dimensional, una herramienta que verifica la coherencia de las dimensiones (o unidades) en ambas partes de una ecuación, con el fin de determinar su aplicabilidad real (homogeneidad dimensional) (Martínez, 2004).

### 11.2.2 Resultado Simulaciones

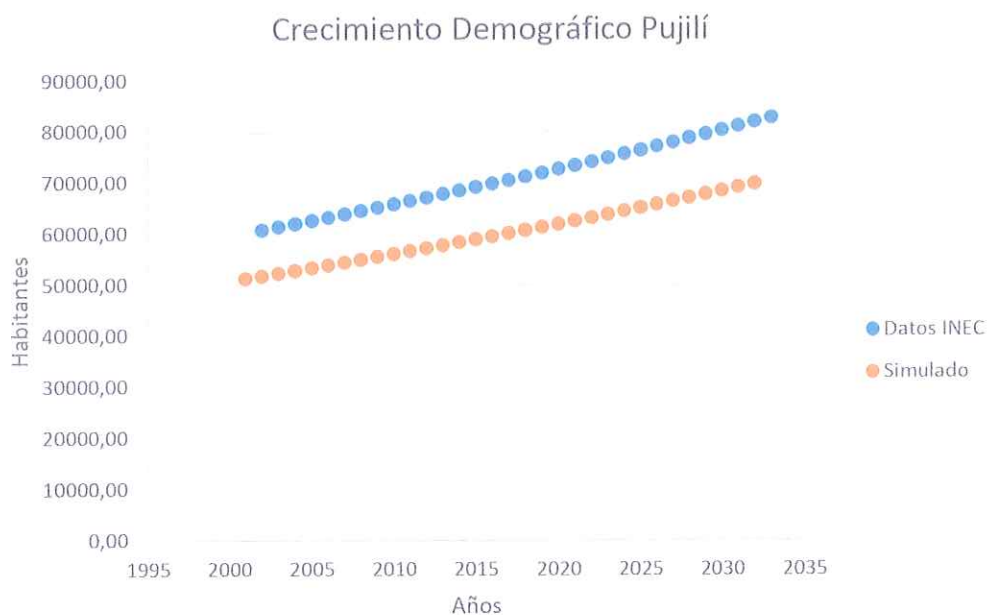
Después de estructurar el problema de manera cualitativa, se integró la información cuantitativa al simular el modelo con los datos recopilados durante la revisión bibliográfica. La simulación se llevó a cabo utilizando el software Vensim Ple, considerado como experimentación del sistema según la definición de Aracil (1995). Los primeros resultados se visualizaron a través del diagrama de niveles y flujos, así como del modelo matemático. La Tabla 2 presenta los datos utilizados como condiciones iniciales para cada variable y cómo se obtuvieron dichos valores.

### 11.2.3 Validación del Modelo

En primer lugar, la calibración implica optimizar todas las variables y flujos mediante la comparación de los comportamientos modelados con los obtenidos a partir de la revisión bibliográfica, es decir, las tendencias identificadas. La validación, por otro lado, se centra en el análisis de los errores relativos y su ajuste para garantizar su minimización, lo que asegura la confiabilidad de los resultados futuros, según lo señala Méndez (2012).

Para llevar a cabo este proceso, la variable inicialmente analizada es la población, dado que cuenta con la mayor disponibilidad de información y constituye la base fundamental del modelo. Para evaluar si la variable sigue las tendencias reales, se utiliza como referencia el año 2001, en el cual, según datos del INEC, la población urbana de Pujilí alcanzaba un total de 60.728 personas (INEC, 2015). Al considerar, además, las tasas de incremento neto definidas en el Anexo 2, se generan los resultados representados en la Figura 3.

Figura 3. Figura 16 Crecimiento demográfico Pujilí



Nota: Datos reales contra simulación para afinar el modelo Vensim

Comparando los resultados obtenidos a través del modelo con los proporcionados por el INEC, se puede afirmar que el modelo sigue la trayectoria de los datos reales. Además, el mayor error relativo registrado fue del 2,68 %, indicando que la disparidad entre los valores no es significativa y que los datos modelados representan de manera cercana la realidad de la población en la ciudad.

Otra variable susceptible de calibración es la referente a los Residuos Dispuestos en el Relleno Sanitario, que registró un valor de 1.860.000 toneladas en 2019, 2.239.335 en 2020 y 2.253.072 en 2021, según datos del Municipio de Pujilí (s.f.). Como se aprecia en la Figura 4, los resultados modelados exhiben una tendencia semejante a los datos recopilados, aunque no replican de manera exacta sus comportamientos. Esto se refleja en los errores relativos, los cuales oscilan entre el 2,50408 % y el 16,59291 %.

Figura 17. Datos Gobierno Autónomo Descentralizado Pujilí contra datos Simulados





### 11.1 Discusión de resultados para la Optimización del Sistema de Gestión Integral de Residuos Sólidos.

Escenarios modelados: después de las respectivas validaciones y calibraciones, se modelan las condiciones actuales de las variables, así como también 4 simulaciones que representan diferentes estrategias que buscan mejorar la eficiencia del sistema y los resultados de los indicadores de calidad de aire y ambiente.

El primer escenario representa un caso en el que se aumenta 3 veces la separación en la fuente y las demás condiciones se mantienen; el segundo escenario muestra un 20 % de todo tipo de aprovechamiento, dividido en 8,45 % para orgánicos y 11,55 % de reciclaje; al tercero, con las mismas condiciones del segundo, se le suma un aumento en 3 veces la separación en la fuente; por último, el cuarto escenario se caracteriza por un 21,12 % de aprovechamiento, 28,88 % de reciclaje y 3 veces la separación en la fuente.

Figura 18 Comportamiento de la disposición final en diferentes escenarios. Fuente: Autores.

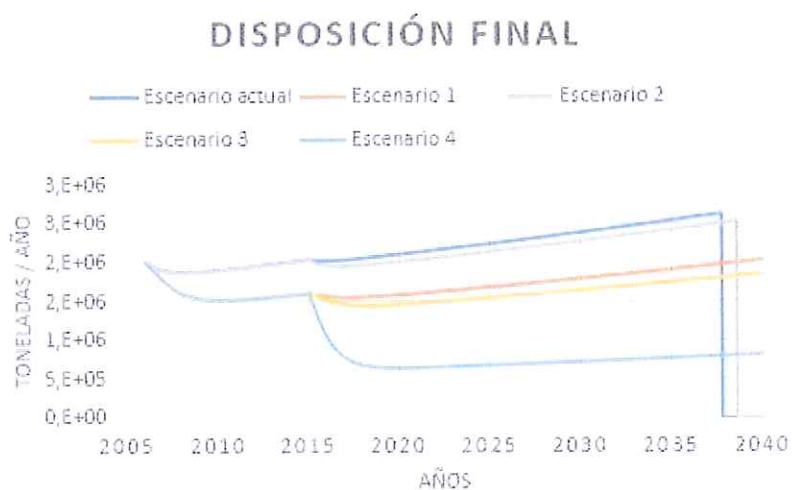


Figura 19 Comportamiento de la capacidad del relleno sanitario en diferentes escenarios. Fuente: Autores.

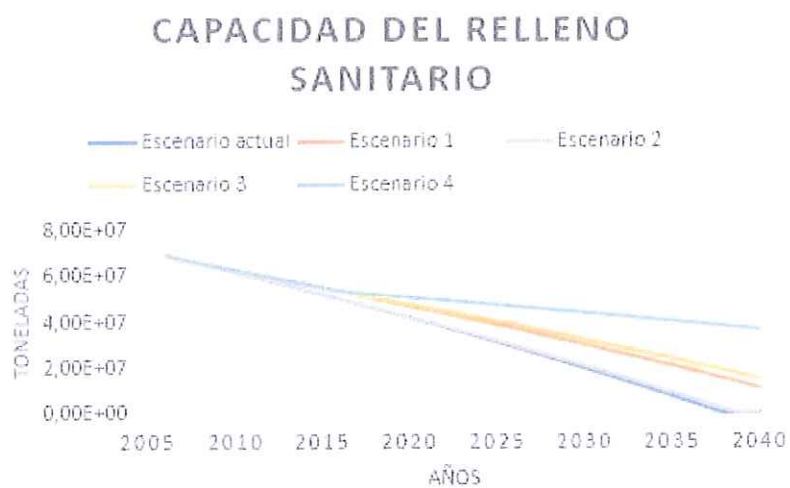


Figura 20 Comportamiento del indicador de residuos aprovechados en diferentes escenarios. Fuente: Autores.

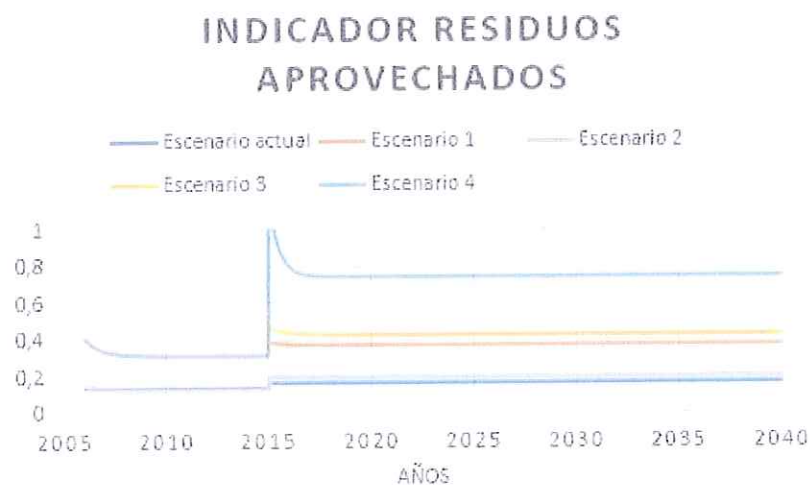


Figura 21. Comportamiento del indicador de residuos dispuestos en diferentes escenarios. Fuente: Autores.



En las figuras 5 y 6 se observa claramente, que el escenario actual puede mejorar y que pueden llevarse menos residuos al relleno sanitario. El escenario 2 demuestra la menor eficiencia, debido a que en menos de un año iguala la cantidad de residuos dispuestos del escenario actual, agotando así la vida útil del relleno sanitario en un período corto. Con el escenario 1, para el 2040 se tendría espacio disponible para 11.319.800 toneladas de residuos y con el escenario 3, para 14.934.000 toneladas.

#### 11.4.1.2 Discusión de los resultados

En cuanto al indicador de residuos aprovechados, con el escenario 3 se alcanzaría un aprovechamiento constante del 42 %, con el escenario 1 se mantendría un valor de 37 % y con el escenario 2, un aprovechamiento del 19 %, 3 puntos porcentuales por encima del escenario actual.

Teniendo en cuenta la ecuación 2, un valor alto del indicador de residuos dispuestos señala que más residuos del total de los generados se llevan a disposición; si el objetivo es aprovechar más residuos y disminuir de forma importante los que se llevan al relleno sanitario, es importante que este indicador tenga valores bajos. El escenario actual mantiene un valor de 81,37 % de residuos dispuestos adecuadamente, el escenario 2 de 78,05 %, el escenario 1 de 61,29 % y el escenario 3 de 55,94 %.

De acuerdo con todo lo anterior, el escenario 2, que plantea un aumento del 3,41 % en el aprovechamiento total (tanto de orgánicos, como reciclaje), es el que genera menos mejoras, pues los resultados muestran que las tendencias se comportan de forma muy similar al escenario actual. Luego, el escenario 1, que busca aumentar únicamente la separación en la fuente, además de prolongar la vida útil del relleno sanitario, mejora en un 21 % el indicador de residuos aprovechados y en 20,08 % el indicador de residuos dispuestos adecuadamente; el escenario 3, como conjunto de los dos anteriores, refleja aumento del 26 % en el primer indicador y, comparado con el escenario actual, el segundo indicador muestra que es un 25,43 % más favorable.

Finalmente, el escenario 4, que busca aumentar 33,41 % el total de aprovechamiento e incentivar la separación en la fuente, permite ver los mejores resultados, pues para el 2040 se tendría espacio disponible para 36.365.900 toneladas de residuos, 21.431.900 más que el escenario 3; además, el indicador

de residuos aprovechados alcanza el 74,54 % y el de residuos dispuestos adecuadamente 24,54 %, los más favorables del análisis.

En su investigación, Sáez y Urdaneta (2014), llegaron a la conclusión de que en América Latina y el Caribe, la gestión de residuos se enfoca en la recolección y en la disposición final, sin prestar la suficiente atención a las demás variables del sistema; sumado a lo anterior, Porras (2018), afirma que, específicamente, en el departamento de Cundinamarca, los rellenos sanitarios se han tomado como la única alternativa, dejando de lado otras estrategias importantes. Pujilí no es ajena a la situación descrita y las distintas problemáticas que hoy se presentan, se han generado debido a la falta de un análisis integral del sistema.

Como se pudo ver con los distintos escenarios, la ciudad necesita plantear estrategias que tengan como objetivo incrementar el aprovechamiento de residuos y así disminuir la cantidad que se destina a disposición final.

11.4.1.2.1. Análisis de mejora en el Sistema de Gestión Integral de Residuos Sólidos. Según el Gobierno Nacional, hay diversas maneras de mejorar el manejo de los desechos sólidos en una ciudad como Pujilí agrupadas en cuatro categorías principales: el primer grupo aborda estrategias para reducir la producción de residuos, disminuir la cantidad dispuesta y fomentar la reutilización, aprovechamiento y tratamiento de los mismos; el segundo grupo se enfoca en la sociedad y busca implementar estrategias educativas sobre este tema; el tercer grupo se dirige a otros actores y pretende que cada participante en la gestión asuma plena responsabilidad y actúe para mejorar el proceso; finalmente, el cuarto grupo busca que las autoridades ambientales ejerzan controles estrictos sobre cada actividad relacionada con la gestión de los residuos (CONPES 3874, 2016). Todas estas estrategias son fundamentales para el sistema, ya que permiten reducir la generación de residuos, incrementar la separación y aprovechamiento, disminuir la contaminación y prolongar la vida útil del vertedero sanitario (Ávila, Nieto, Jiménez y Osorio, 2011).

El análisis de los diferentes escenarios permite ver que la opción que incrementa la separación en la fuente (escenario 1) tiene un mejor resultado que aquella que plantea un mayor aprovechamiento de los residuos (escenario 2), lo que indica que es indispensable que la Alcaldía se enmarque, inicialmente, en el segundo grupo de estrategias, es decir, la educación a la población. Como lo mencionan varios autores, para obtener buenos resultados es clave sensibilizar a la población con respecto a los residuos generados en cada una de las actividades diarias e impulsar su participación responsable en el sistema de gestión (Sáez y Urdaneta, 2014; Ávila, Nieto, Jiménez y Osorio, 2011).

Desde la Alcaldía anterior se ha buscado que se seleccionen los residuos ordinarios en bolsa negra y los residuos reciclables en bolsa blanca, lo cual puede explicar el aumento del 5,12 % en el aprovechamiento de residuos del 2016 al 2017. Sin embargo, se deben plantear estrategias más sólidas, que busquen una selección más estricta de los residuos, es decir que, por ejemplo, se separe materia orgánica de los residuos ordinarios y el plástico del papel y cartón; además, es claro que se debe buscar un incremento en la cantidad de personas que realicen separación en la fuente, para que toda la gestión sea más eficiente.

Establecer políticas públicas efectivas debe ser el primer paso para generar cambios positivos importantes en todo el sistema de gestión de residuos sólidos en Pujilí, sin embargo, para esto es fundamental el interés, la inversión y la coordinación de quienes gobiernan la ciudad, quienes tienen a cargo este servicio y todas aquellas instituciones con competencia en esta gestión (Sáez y Urdaneta, 2014; Porras, 2018); además, debe contarse con el apoyo de las autoridades ambientales, para verificar que cada actividad involucrada en la gestión de residuos se esté llevando a cabo adecuadamente y que no impacte negativamente la calidad ambiental urbana.

Continuando con la línea de estrategias, la Alcaldía, luego de promover la educación a la población, debe buscar la minimización de la cantidad de residuos que se llevan a disposición a través de incentivos a empresas o asociaciones que

se dediquen a reciclar, tratar, reutilizar o aprovechar residuos. Es importante, entonces, que se eduque a la población recicladora en temas como la gestión empresarial y el Registro Único de Recicladores de Oficio (RURO); además, que se planee adecuadamente el proceso para la formalización de los mismos y que se brinden mecanismos más eficientes para la recolección selectiva. Estas estrategias atenderán el aspecto fundamental de los problemas principales del sistema de gestión de residuos en Pujilí: la informalidad, pues, tal como sucede en algunos países de América Latina y el Caribe, aún se observan personas que trabajan en las calles, separando los residuos que desde los hogares no se segregan (Sáez y Urdaneta, 2014).

La formalización de los recicladores es un punto clave, pues esto permite organizar toda la cadena desde la recolección hasta la comercialización de los nuevos productos, teniendo en cuenta aspectos como las rutas selectivas, la sectorización de la ciudad y el establecimiento formal de centros acopio, transferencia, reciclaje y aprovechamiento, tal como lo afirmó Porras (2018), como conclusión al análisis del modelo de residuos en Chía, Cundinamarca.

Además, es importante también que el GAD Municipal tome en cuenta los registros que existen de cantidad y caracterización de los residuos sólidos que se generan en la ciudad y aquellos que llegan al relleno sanitario (Sáez y Urdaneta, 2014), para que a partir de todos estos datos, se planifique adecuadamente el sistema de gestión y se puedan tomar en cuenta otras estrategias alternativas al relleno sanitario, como la incineración de ciertos residuos, tal como lo registró Sánchez (2012).

Según Goicochea (2015), en los últimos años se han desarrollado distintos modelos para la gestión de residuos sólidos, vinculando variables sociales, económicas y ambientales, con el fin de apoyar la toma de decisiones; sin embargo, es importante tener en cuenta que todos los modelos tienen limitaciones, al asumir ciertas variables y no considerar todo el proceso. Por ejemplo, en Pujilí, así como en otras ciudades de América Latina y el Caribe, una

de las limitaciones más grandes en la gestión de residuos sólidos es el cambio de administración, pues genera discontinuidad en todos los procesos (Sáez y Urdaneta, 2014).

#### 11.1.4.1.2 Estrategias de mejora de la gestión de residuos sólidos.

Promover la Separación en la Fuente (Kaza et al., 2018), Implementar programas educativos que destaquen la importancia de la separación en la fuente. Distribuir contenedores de reciclaje y compostaje a los hogares. Optimizar la Recolección de Residuos (Hoornweg y Bhada-Tata, 2012): Utilizar tecnologías de monitoreo y rutas eficientes para la recolección. Establecer horarios de recolección claros y eficientes.

Fomentar la Economía Circular (Ellen MacArthur Foundation, 2015): Colaborar con empresas locales para establecer programas de reciclaje y reutilización. Desarrollar sistemas de depósito y retorno para envases reutilizables. Implementar Tecnologías Innovadoras (Wilson et al., 2017): Utilizar sensores y sistemas de monitoreo inteligentes para la gestión eficiente de residuos. Implementar tecnologías emergentes como la inteligencia artificial para predecir patrones de generación de residuos. Involucrar a la Comunidad (Liu et al., 2018): Organizar eventos comunitarios y campañas de concientización. Establecer programas de voluntariado para la limpieza y gestión de desechos. Apoyar a los Recicladores Informales (Medina, 2011): Formalizar la participación de los recicladores informales en la cadena de gestión de residuos. Proporcionar capacitación y equipo de seguridad para mejorar sus condiciones laborales. Aplicar Tarifas Diferenciadas (Van Eygen et al., 2018): Establecer sistemas de tarifas que incentiven la reducción de residuos. Ofrecer descuentos a hogares que participen activamente en programas de reciclaje.

Desarrollar Infraestructuras Sostenibles (UNEP, 2015): Mejorar la infraestructura para la clasificación y procesamiento eficiente de residuos.

Desarrollar instalaciones de tratamiento de residuos que prioricen la sostenibilidad.



Realizar Auditorías y Evaluaciones (Oberlin et al., 2020): Llevar a cabo auditorías periódicas del sistema de gestión de residuos. Evaluar el impacto ambiental y la eficacia de las iniciativas implementadas.