



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 DEL RELLENO SANITARIO EN LA MANCOMUNIDAD
PELILEO–PATATE, MEDIANTE LA PROYECCIÓN Y COMPARACIÓN
DE CUATRO ESCENARIOS CON DINÁMICA DE SISTEMAS”**

Proyecto de investigación presentado previo a la obtención del Título de
Ingenieras Ambientales

Autoras:

Camacho Calderón Johana Estefanía

Paredes Vaca Karen Daniela

Tutor:

Ágreda Oña José Luis

LATACUNGA – ECUADOR

Marzo 2026

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Camacho Calderón Johana Estefanía, con cédula de ciudadanía No. 1150626313 y Paredes Vaca Karen Daniela, con cédula de ciudadanía No. 0550630693, declaramos ser autores del presente Proyecto de Investigación: **“EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS DEL RELLENO SANITARIO EN LA MANCOMUNIDAD PELILEO-PATATE, MEDIANTE LA PROYECCIÓN Y COMPARACIÓN DE CUATRO ESCENARIOS CON DINÁMICA DE SISTEMAS”**, siendo el Ingeniero Mg. José Luis Ágreda Oña, Tutor del presente trabajo; y, eximimos expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

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

Latacunga, 23 de febrero del 2026

Johana Estefanía Camacho Calderón
C.C: 1150626313
ESTUDIANTE

Karen Daniela Paredes Vaca
C.C: 0550630693
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 **CAMACHO CALDERÓN JOHANA ESTEFANÍA**, identificada con cédula de ciudadanía **1150626313** de estado civil soltera, a quien en lo sucesivo se denominará **LA CEDENTE**; y, de otra parte, la Doctora Idalia Eleonora 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. - **LA CEDENTE** es una persona natural estudiante de la carrera de Ingeniería Ambiental, titular de los derechos patrimoniales y morales sobre el trabajo de grado **“EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS DEL RELLENO SANITARIO EN LA MANCOMUNIDAD PELILEO-PATATE, MEDIANTE LA PROYECCIÓN Y COMPARACIÓN DE CUATRO ESCENARIOS CON DINÁMICA DE SISTEMAS”**, 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: Octubre 2021 – Marzo 2022

Finalización de la carrera: Octubre 2025 – Marzo 2026

Tutor: Ing. José Luis Ágreda Oña, Mg.

Tema: **“EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS DEL RELLENO SANITARIO EN LA MANCOMUNIDAD PELILEO-PATATE, MEDIANTE LA PROYECCIÓN Y COMPARACIÓN DE CUATRO ESCENARIOS CON DINÁMICA DE SISTEMAS”**

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, hacerlo en formato digital de la presente investigación.

CLÁUSULA TERCERA. - Por el presente contrato, **LA 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 **LA 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 publicación del trabajo de grado.
- c) La traducción, adaptación, arreglo u otra transformación del trabajo de grado con fines académicos y de consulta.
- d) La importación al territorio nacional de copias del trabajo de grado hechas sin autorización del titular del derecho por cualquier medio incluyendo mediante transmisión.

e) Cualquier otra forma de utilización del trabajo de grado que no está contemplada en la ley como excepción al derecho patrimonial.

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 **LA 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 **LA 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 **LA 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 23 días del mes de febrero del 2026.

Johana Estefanía Camacho Calderón
LA CEDENTE

Dra. Idalia Pacheco Tigselema, Ph.D.
LA CESIONARIA

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 **PAREDES VACA KAREN DANIELA**, identificada con cédula de ciudadanía **0550630693** de estado civil soltera, a quien en lo sucesivo se denominará **LA CEDENTE**; y, de otra parte, la Doctora Idalia Eleonora 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. - **LA CEDENTE** es una persona natural estudiante de la carrera de Ingeniería Ambiental, titular de los derechos patrimoniales y morales sobre el trabajo de grado **“EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS DEL RELLENO SANITARIO EN LA MANCOMUNIDAD PELILEO-PATATE, MEDIANTE LA PROYECCIÓN Y COMPARACIÓN DE CUATRO ESCENARIOS CON DINÁMICA DE SISTEMAS”**, 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: Octubre 2021 – Marzo 2022

Finalización de la carrera: Octubre 2025 – Marzo 2026

Tutor: Ing. José Luis Ágreda Oña, Mg.

Tema: **“EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS DEL RELLENO SANITARIO EN LA MANCOMUNIDAD PELILEO-PATATE, MEDIANTE LA PROYECCIÓN Y COMPARACIÓN DE CUATRO ESCENARIOS CON DINÁMICA DE SISTEMAS”**

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, hacerlo en formato digital de la presente investigación.

CLÁUSULA TERCERA. - Por el presente contrato, **LA 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 **LA 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 publicación del trabajo de grado.
- c) La traducción, adaptación, arreglo u otra transformación del trabajo de grado con fines académicos y de consulta.
- d) La importación al territorio nacional de copias del trabajo de grado hechas sin autorización del titular del derecho por cualquier medio incluyendo mediante transmisión.

- e) Cualquier otra forma de utilización del trabajo de grado que no está contemplada en la ley como excepción al derecho patrimonial.

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 **LA 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 **LA 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 **LA 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 23 días del mes de febrero del 2026.

Karen Daniela Paredes Vaca
LA CEDENTE

Dra. Idalia Pacheco Tigselema, Ph.D.
LA CESIONARIA

AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

En calidad de Tutor del Proyecto de Investigación con el título:

“EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS DEL RELLENO SANITARIO EN LA MANCOMUNIDAD PELILEO–PATATE, MEDIANTE LA PROYECCIÓN Y COMPARACIÓN DE CUATRO ESCENARIOS CON DINÁMICA DE SISTEMAS”, de Camacho Calderón Johana Estefanía y Paredes Vaca Karen Daniela, 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 han incorporado las observaciones y recomendaciones propuestas en la Pre defensa.

Latacunga, 23 de febrero del 2026

Ing. José Luis Ágreda Oña, Mg.
C.C: 0401332101
DOCENTE TUTOR

AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

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, los postulantes: Camacho Calderón Johana Estefanía y Paredes Vaca Karen Daniela, con el título del Proyecto de Investigación: **“EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS DEL RELLENO SANITARIO EN LA MANCOMUNIDAD PELILEO-PATATE, MEDIANTE LA PROYECCIÓN Y COMPARACIÓN DE CUATRO ESCENARIOS CON DINÁMICA DE SISTEMAS”**, han 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 grabar los archivos correspondientes en un CD, según la normativa institucional.

Latacunga, 23 de febrero del 2026

Ing. Vladimir Ortiz Bustamante, Ph.D.
C.C: 0502188451
LECTOR 1 (PRESIDENTE)

Dra. Kalina Fonseca Largo, Ph.D.
C.C: 1723534457
LECTOR 2 (MIEMBRO)

Ing. Andrés Sebastián Moreno Ávila, Mg.
C.C: 0503220063
LECTOR 3 (MIEMBRO)

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco infinitamente a Dios, por regalarme la vida, la sabiduría y la fortaleza necesarias para culminar esta meta tan importante. En cada dificultad sentí su presencia guiando mis pasos y dándome la fe para no rendirme.

A la Santísima Virgen, especialmente a la Virgen de la Caridad, por cubrirme con su manto protector y acompañarme en cada momento de este proceso académico.

A mi amado hijo, Gabriel Jácome, quien es mi mayor bendición y mi principal motivación. Hijo mío, cada esfuerzo, cada desvelo y cada sacrificio han sido por ti y para ti. Eres la razón que impulsa mis sueños y mi deseo constante de superación.

A mi pareja, John Jácome, por su amor, apoyo incondicional y paciencia. Gracias por caminar a mi lado, por sostenerme en los momentos de cansancio y por creer siempre en mi capacidad para lograrlo.

A mis queridos padres, Julio y Clara, por su ejemplo de lucha, sus consejos y su amor infinito. Gracias por enseñarme que con esfuerzo y perseverancia todo es posible. Este logro también les pertenece.

A mis hermanos: Eugenia, Consuelo, Mario, Manuel, Mónica María y José, por su cariño, sus palabras de aliento y por acompañarme siempre en cada etapa de mi vida. Su apoyo ha sido fundamental para no desistir.

A mi suegra Martha por su apoyo, comprensión y ánimo constante durante este proceso.

A mi querida amiga, Karen Paredes, gracias por tu amistad sincera, por escucharme, aconsejarme y brindarme palabras de motivación cuando más lo necesité.

A mi tutor, Ingeniero José Luis Ágreda Oña, por su guía profesional, paciencia y dedicación durante el desarrollo de esta investigación. Sus conocimientos y orientaciones fueron fundamentales para la culminación exitosa de este trabajo.

A mi querida universidad, por abrirme las puertas del conocimiento, formarme profesionalmente y permitirme crecer tanto académica como personalmente.

Johana Estefanía Camacho Calderón

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por sostenerme cuando mis fuerzas se agotaban por iluminar mi camino en los momentos de incertidumbre y por guiarme en cada paso que recorrí en el transcurso académico.

A mis padres, quienes con esfuerzo, sacrificio y ejemplo me enseñaron que los sueños se alcanzan con perseverancia y fe por siempre ser mi hogar, mi impulso y mi razón para seguir adelante, por nunca dejarme sola a pesar de las dificultades.

A mis hermanas y hermanos por siempre apoyarme, por su compañía, palabras de ánimo y por sostenerme en los momentos de debilidad. Su confianza fue parte esencial de este camino.

A mi mejor amiga, Johana Camacho por siempre estar conmigo en todo momento por sus palabras por ser otra hermana más. Gracias por tu amistad que fue un refugio en los días difíciles, porque tu compañía y tu fuerza, el camino habría sido más difícil.

A la Universidad Técnica de Cotopaxi Facultad por abrirme las puertas del conocimiento y brindarme la oportunidad de formarme no solo como profesional, sino también como ser humano. Gracias por proporcionarme de las herramientas académicas, los espacios de aprendizaje y los valores que hoy forman parte de mí.

A mi tutor de tesis, Ing. José Luis Ágreda Oña, gracias por su guía, paciencia y valioso apoyo durante el desarrollo de este trabajo por sus enseñanzas y acompañamiento que fueron fundamentales para culminar este proceso Universitario.

Karen Daniela Paredes Vaca

DEDICATORIA

Dedico este logro, con todo mi amor, a mi hijo, Gabriel Jácome, quien es mi mayor inspiración y la razón de cada esfuerzo realizado. Hijo mío, cada sacrificio y cada desvelo han sido pensando en darte un mejor ejemplo y futuro. Eres mi fuerza y mi motor para seguir adelante.

A mi pareja, John Jácome, por su amor incondicional, su apoyo constante y por acompañarme en cada paso de este camino. Gracias por creer en mí y sostenerme en los momentos más difíciles.

A mis padres, Julio y Clara, por su infinito amor, sus enseñanzas y el ejemplo de lucha que me han brindado toda la vida. Este logro es el reflejo de los valores que sembraron en mí.

Y a toda mi familia, por su cariño, sus oraciones y palabras de aliento. Cada uno de ustedes ha sido parte fundamental para alcanzar esta meta.

Con profundo amor y gratitud, les dedico este sueño hecho realidad.

Johana Estefanía Camacho Calderón

DEDICATORIA

A mi padre, Luis Jordán Paredes, por ser mi pilar fundamental en mi vida por brindar su amor en los momentos más difíciles que a pesar que pasaba sus momentos malos nunca me dejó sola, gracias por su apoyo y por ayudarme a terminar mis metas.

A mi madre, María Narcisa Vaca que fue mi gran apoyo por siempre estar presente en cada paso recorrido durante este proceso académico, por enseñarme valores, por su esfuerzo, amor incondicional, gracias por enseñarme a luchar sin rendirme.

A mi hermana, Jéssica Paredes por ser como mi segunda madre que siempre estuvo en cada paso recorrido, por ser mi gran apoyo en todo momento y por nunca dejarme sola.

A mi bebé que hoy habita en el cielo, mi pequeño ángel, quien, aunque no pudo caminar físicamente conmigo en este proceso, estuvo presente en cada lagrима, en cada noche de desvelo y en cada esfuerzo realizado. Tu recuerdo fue mi impulso cuando sentía que no podía continuar.

A toda mi familia, le agradezco a Dios porque siempre estuvieron apoyándome y por tenerlos conmigo en todo momento.

Karen Daniela Paredes Vaca

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES

TÍTULO: “EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS DEL RELLENO SANITARIO EN LA MANCOMUNIDAD PELILEO-PATATE, MEDIANTE LA PROYECCIÓN Y COMPARACIÓN DE CUATRO ESCENARIOS CON DINÁMICA DE SISTEMAS”.

AUTORES:

Johana Estefanía Camacho Calderón
Karen Daniela Paredes Vaca

RESUMEN

La gestión de residuos sólidos en Patate y Pelileo enfrenta una presión estructural derivada del crecimiento demográfico y la baja eficiencia en separación y aprovechamiento, comprometiendo la sostenibilidad del relleno sanitario, cuya capacidad disponible es inferior al 30 %. El estudio evaluó el desempeño del sistema de gestión integral mediante dinámica de sistemas, proyectando cuatro escenarios prospectivos. Se desarrolló un estudio descriptivo explicativo con caracterización física mediante método de cuarteo y estimación de producción per cápita (0,74 kg/hab/día). La composición promedio fue 52 % materia orgánica, 24 % reciclables y 24 % no aprovechables. Se creó un modelo stock-flujo en Vensim que juntó generación, recuperación, compostaje, desecho final y capacidad restante, simulando indicadores de presión operativa y vida útil. En el escenario tendencial, el 85 % de los residuos se dispone finalmente y el relleno se satura en dos años y ocho meses. El escenario de separación en la fuente del 30 % reduce 25 % la presión operativa y eleva la recuperación al 18 %, constituyéndose en la alternativa más eficiente en términos de factibilidad inmediata. La valorización del 20 % evita 1 250 t/año, condicionada a ampliación de infraestructura. El escenario combinado (50 % de aprovechamiento) extiende la vida útil en siete años y reduce 60 % la disposición final, representando el mayor impacto potencial bajo condiciones de expansión operativa. Se concluye que, para que el sistema sea sostenible, es necesario mejorar la separación de residuos desde su origen y planificar gradualmente las capacidades de reciclaje, enfocándose en acciones que sean posibles y que tengan un gran impacto en la estructura.

Palabras clave: economía circular, gestión de residuos, separación en la fuente, valorización de residuos.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI
FACULTY OF AGRICULTURAL SCIENCES AND NATURAL RESOURCES

THEME: “EVALUATION OF THE INTEGRATED WASTE MANAGEMENT SYSTEM OF THE PELILEO–PATATE JOINT LANDFILL THRU THE PROJECTION AND COMPARISON OF FOUR SCENARIOS USING SYSTEM DYNAMICS.”

AUTHORS:

Johana Estefanía Camacho Calderón
Karen Daniela Paredes Vaca

ABSTRACT

Solid waste management in Patate and Pelileo faces structural pressure derived from population growth and low efficiency in separation and use, compromising the sustainability of the landfill, whose available capacity is less than 30%. The study evaluated the performance of the integrated management system through system dynamics, projecting four prospective scenarios. An explanatory descriptive study was developed with physical characterization by quartering method and estimation of per capita production (0.74 kg/inhabitant/day). The average composition was 52% organic matter, 24% recyclable and 24% non-usable. A stock-flow model was created in Vensim that brought together generation, recovery, composting, final waste and remaining capacity, simulating operating pressure and useful life indicators. In the trend scenario, 85% of the waste is finally disposed of and the landfill is saturated in two years and eight months. The 30% source separation scenario reduces operating pressure by 25% and increases recovery to 18%, making it the most efficient alternative in terms of immediate feasibility. The recovery of 20% avoids 1,250 t/year, conditioned by the expansion of infrastructure. The combined scenario (50% utilization) extends the useful life by seven years and reduces final disposal by 60%, representing the greatest potential impact under conditions of operational expansion. It is concluded that, for the system to be sustainable, it is necessary to improve the separation of waste from its source and gradually plan recycling capacities, focusing on actions that are possible and that have a great impact on the structure.

Keywords: circular economy, waste management, separation at source, waste recovery.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN DE AUTORÍA	ii
CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR	iii
CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR	v
AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN	vii
AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN	viii
AGRADECIMIENTO.....	ix
AGRADECIMIENTO.....	x
DEDICATORIA	xi
DEDICATORIA	xii
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	xv
ÍNDICE DE TABLAS.....	xviii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xix
1. INFORMACIÓN GENERAL	1
2. INTRODUCCIÓN	2
3. JUSTIFICACIÓN.....	5
4. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN	7
5. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	7
6. OBJETIVOS	9
6.1 OBJETIVO GENERAL	9
6.2 OBJETIVO ESPECÍFICO	9
6.3 ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN CON LOS OBJETIVOS PLANTEADOS.....	10
7. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICA	12
7.1 Residuos sólidos.....	12
7.1.1 Jerarquización de residuos.....	12
7.1.2 Principios de la gestión de residuos sólidos	15
7.1.3 Enfoques de la gestión integral de residuos sólidos	16
7.1.4 Economía circular y valorización de residuos sólidos.....	16
7.2 Tipos de residuos sólidos	17
7.2.1 Métodos de caracterización	19
7.2.2 Etapas del método de cuarteo de residuos	21
7.3 Contexto actual en Ecuador	27
7.4 Tecnologías emergentes de valorización.....	28

7.5	Modelación de escenarios	30
7.6	Dinámica de sistemas.....	31
7.6.1	Herramientas de la dinámica de sistemas.....	31
7.7	Etapas de un sistema de gestión integral de residuos sólidos.....	32
7.8	Marco legal.....	34
8.	PREGUNTA DE INVESTIGACION.....	35
9.	METODOLOGÍA	38
9.1	ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN.....	38
9.2	TIPOS DE INVESTIGACIÓN	39
9.2.1	Investigación descriptiva	39
9.2.2	Investigación explicativa.....	39
9.2.3	VARIABLES DEL MODELO	40
9.2.4	Indicadores de desempeño del sistema.....	42
9.3	ÁREA DE ESTUDIO.....	43
9.4	MÉTODOS	45
9.4.1	Procedimiento técnico y control de calidad.....	46
9.4.2	Producción Per Cápita por día (PPC).....	46
9.4.3	Prueba de composición física	47
9.5	Simulación del modelo.....	47
9.5.1	Capacidad del relleno sanitario	50
9.5.2	Cálculo de tasas específicas para el modelado	50
9.5.3	Proceso del modelado.....	51
9.5.4	Diseño del modelo.....	52
9.5.5	Análisis y visualización de resultados	52
9.6	TÉCNICAS	53
9.7	Revisión documental.....	53
9.8	Diagramas causales	53
10.	POBLACIÓN Y MUESTRA	53
10.1	Población	53
10.2	Muestra	54
11.	INSTRUMENTOS Y MATERIALES.....	55
12.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	56
12.1	Resultados método de cuarteo Cantón Patate	56
12.1.1	Caracterización de residuos sólidos cantón Patate.....	58
12.2	Resultados método de cuarteo Cantón Pelileo.....	59
12.2.1	Caracterización de residuos sólidos cantón Pelileo.....	61
12.3	Modelo dinámica de sistemas	62

12.4	Comparación de escenarios	65
	Resultados del objetivo 3	68
12.5	Generación de residuos poblacional	68
12.5.1	Material recuperado	69
12.5.2	Compost producido	71
12.5.3	Residuos en relleno	72
12.5.4	Ocupación del relleno	74
12.5.5	Vida útil del relleno sanitario	75
12.5.6	Llegada al relleno sanitario	77
12.5.7	Capacidad del relleno sanitario	78
12.5.8	Residuos aprovechados	80
12.6	Determinación del escenario más eficiente.....	81
12.7	Evaluación integral del sistema mancomunado	83
13.	IMPACTOS (TÉCNICOS, SOCIALES, AMBIENTALES O ECONÓMICOS)	86
13.1	Impactos técnicos.....	86
13.2	Impactos sociales	87
13.3	Impactos ambientales.....	87
13.4	Impactos económicos.....	88
14.	CONCLUSIONES	88
15.	RECOMENDACIONES	91
16.	BIBLIOGRAFÍA.....	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Beneficiarios del proyecto	7
Tabla 2. Actividades y sistema de tarea de los objetivos	11
Tabla 3. Elementos de la jerarquía de gestión de residuos sólidos	13
Tabla 4. Ámbitos de sostenibilidad en gestión de residuos sólidos	14
Tabla 5. Principios de la gestión de residuos sólidos	15
Tabla 6. Materiales reciclables	18
Tabla 7. Categorías de los desechos sólidos	18
Tabla 8. Etapas del método de cuarteo	21
Tabla 9. Etapas de la separación en la fuente	22
Tabla 10. Etapas de la recolección.....	23
Tabla 11. Etapas de operación de un relleno sanitario.....	27
Tabla 12. Tipos de tratamiento y valorización de residuos sólidos	29
Tabla 13. Tecnologías para el tratamiento y valorización de residuos sólidos	30
Tabla 14. Herramientas de la Dinámica de Sistemas.....	32
Tabla 15. Etapas de un sistema integrado de gestión de residuos sólidos	33
Tabla 16. Variables para el modelo.....	41
Tabla 17. Simulación del Modelo.....	49
Tabla 18. Cálculo de indicadores método de cuarteo	50
Tabla 19. Población del cantón Patate y Pelileo	54
Tabla 20. Nomenclatura para el cálculo de la muestra	54
Tabla 21. Ficha técnica de cuarteo del cantón Patate	56
Tabla 22. Caracterización de residuos del cantón Patate.....	58
Tabla 23. Ficha técnica de cuarteo.....	59
Tabla 24. Residuos orgánico.....	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Jerarquía para la gestión de residuos sólidos	13
Figura 2. Principios de la economía circular	17
Figura 3. Etapas de un sistema de gestión de residuos	33
Figura 4. Área de estudio.....	45
Figura 5. Método de cuarteo.....	47
Figura 6. Generación per cápita diaria del cantón Patate	57
Figura 7. Generación per cápita diaria del cantón Pelileo	60
Figura 8. Diagrama de simulación.....	64
Figura 9. Diagrama de bigotes, comparación de escenarios.....	65
Figura 10. Generación de residuos	69
Figura 11. Material recuperado.....	70
Figura 12. Compost producido	71
Figura 13. Residuos en relleno	73
Figura 14. Ocupación en relleno sanitario.....	74
Figura 15. Vida útil del relleno sanitario	76
Figura 16. Llegada al relleno sanitario	77
Figura 17. Capacidad restante del relleno sanitario.....	79
Figura 18. Residuos aprovechados	80

1. INFORMACIÓN GENERAL

Título: Evaluación del sistema de gestión integral de residuos del relleno sanitario en la mancomunidad Pelileo–Patate, mediante la proyección y comparación de cuatro escenarios con dinámica de sistemas.

Fecha de inicio: enero 2025

Fecha de finalización: marzo 2026

Lugar de ejecución: Universidad Técnica de Cotopaxi

Facultad que auspicia: Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales

Carrera que auspicia: Ingeniería Ambiental

Proyecto de investigación vinculado: Conciencia verde Latacunga

Equipo de trabajo:

Ing. MSc.

Johana Estefanía Camacho Calderón

Karen Daniela Paredes Vaca

Área de conocimiento: Sostenibilidad

Línea de investigación: Ver en página de la UTC

Sublíneas de investigación de la carrera:

Sostenibilidad

2. INTRODUCCIÓN

La gestión apropiada de los residuos sólidos se ha convertido en un eje estratégico del manejo territorial actual, en particular en situaciones donde la expansión de las ciudades se acelera y el aumento sostenido de la población residente ejerce más presión sobre los sistemas de recolección y disposición que deben estar orientados al uso de tecnologías inteligentes (Mingaleva et al., 2019). Las investigaciones recientes muestran que la cantidad de residuos aumenta por el crecimiento de la población, la urbanización y los cambios en los hábitos de consumo. Esto supera las capacidades operativas de muchos sistemas locales y municipales (García et al., 2023). Esta circunstancia no solo pone en peligro la sostenibilidad ambiental, sino que también eleva los riesgos sanitarios y logísticos vinculados con una gestión incorrecta de los residuos, lo cual representa un reto para la salud ambiental y la planificación pública (Najar, 2024).

En este contexto, la gestión integral de residuos sólidos se establece como una perspectiva esencial para tratar el problema de forma estructural. Este modelo fomenta la reducción de desechos, su valorización y el empleo eficaz de los recursos, incorporando elementos operativos, económicos y ambientales en un sistema armónico (Petropoulos et al., 2024). Las guías técnicas manejadas por el Ministerio del Ambiente (MAATE) y el Ministerio de Producción (MIPRO) enfatizan que, para tener una gestión integral eficaz, es necesario tomar en cuenta el volumen, la procedencia y los rasgos de los residuos, además de optimizar procesos e implementar gradualmente tecnologías apropiadas (MAATE & MIPRO, 2024). Esta perspectiva integral promueve la transición hacia prácticas sostenibles en las que los desechos se transforman en insumos útiles dentro de un ciclo productivo más responsable (Galavote et al., 2025).

La reeducación de los ciudadanos y la implementación de prácticas sostenibles son igualmente esenciales para fortalecer sistemas eficaces de gestión de residuos, ya que las costumbres de separación y disposición inciden directamente en la eficiencia operativa y en el impacto medioambiental (Herrera et al., 2023). Los estudios recientes indican que la falta de sistemas integrales para la gestión conlleva la contaminación y los daños paisajísticos, así como altos costos sociales y económicos. Por esta razón, varios autores concuerdan en que es necesario reforzar las aptitudes locales para llevar a cabo políticas públicas sólidas y estrategias de gestión que fomenten la responsabilidad compartida entre los ciudadanos (Sánchez et al., 2020).

El manejo de residuos es un elemento fundamental para asegurar la armonía entre los campos social, ambiental y económico desde el punto de vista del desarrollo sustentable. De acuerdo con Reyes et al. (2023), las pautas internacionales más recientes destacan que la sostenibilidad supone el empleo racional de los recursos, la protección de los ecosistemas y el fomento de ambientes urbanos saludables. En este contexto, los sistemas para recolectar, procesar y valorizar desechos se constituyen como herramientas esenciales para disminuir la contaminación, mantener la calidad del medio ambiente y promover maneras de consumir más responsables (Najar, 2024).

La integración de sistemas dentro de las organizaciones territoriales y las instituciones públicas constituye una estrategia para garantizar la sostenibilidad operativa en el largo plazo. La Organización Internacional de Normalización destaca que los sistemas de gestión facilitan la organización de procesos, el aumento de la productividad y la consolidación del proceso decisional (Marzouk & Fattouh, 2022). Al mismo tiempo, estudios recientes subrayan la relevancia de emplear métodos científicos y estandarizados para mejorar el tratamiento de los residuos y analizar su desempeño a través de indicadores verificables (Calpa, 2020).

En el ámbito operativo, la administración de desechos sólidos se organiza con base en perspectivas jerárquicas que tienen como prioridades el reciclaje, la reducción y la reutilización. La viabilidad económica, la participación de las comunidades, el soporte político y la disponibilidad de tecnología son algunos de los elementos que determinan si estos sistemas pueden mantenerse en el tiempo (Jiménez, 2022). Asimismo, el progreso hacia modelos de economía circular apoyado por políticas en Latinoamérica y por evaluaciones recientes sobre sostenibilidad fomenta métodos que disminuyen la producción de residuos a través de su reintegración a los ciclos productivos, lo cual beneficia el crecimiento económico y la protección del medio ambiente (García, 2023; MAATE & MIPRO, 2024).

Para crear tácticas eficaces, es esencial caracterizar los residuos producidos en los hogares y en otras áreas socioeconómicas. Para obtener información útil y mejorar la gestión operativa, optimizando la recolección y reduciendo costos, herramientas como el cuarteo, el Índice de Generación Per Cápita (IGP) y la evaluación de densidades siguen siendo esenciales (UNEP, 2024).

La tecnología, además, juega un papel fundamental. Hoy en día, existen muchas opciones biológicas, térmicas y mecánicas para la valorización y el tratamiento de los residuos.

Los procesos biológicos, como la digestión anaerobia, transforman materia orgánica en compost o biogás (Yao et al., 2023). Esto disminuye el impacto sobre el medioambiente y produce bienes útiles (Foradori, 2020). Los sistemas térmicos, por su parte, como la pirólisis, posibilitan la recuperación de energía. Las tecnologías mecánicas, como la trituración y la separación automatizada, mejoran la eficacia del procesamiento.

Igualmente, los modelos matemáticos y computacionales se han transformado en instrumentos fundamentales para el análisis de sistemas complejos para la gestión de residuos (Yao et al., 2023). Es posible simular situaciones, analizar políticas y anticipar el comportamiento futuro del sistema en diferentes condiciones gracias a la Optimización, la Modelación Basada en Agentes y la Dinámica de Sistemas (Rodríguez & Ibarra, 2019). El uso de estas metodologías posibilita la adopción de decisiones informadas, así como la ejecución de estrategias más exactas y sostenibles.

El objetivo principal de este estudio es analizar qué tan efectivo es el sistema de gestión de residuos de la Empresa Municipal Mancomunada de Aseo Integral de los Cantones Pelileo y Patate (EMMAIT-EP). Esto se realizará mediante el análisis y la comparación de cuatro escenarios de valorización. Se utiliza un modelo dinámico que se adapta a cada cantón para este propósito, comenzando con Pelileo en la primera etapa del análisis. Más adelante, se incluirá a Patate para hacer una evaluación completa del sistema mancomunado.

Se simuló de forma dinámica utilizando el software Vensim, herramienta ampliamente utilizada en estudios ambientales y de gestión urbana, que permite modelar el sistema mediante stocks (acumulaciones), flujos (transferencias), retroalimentaciones y retardos temporales. Esta metodología permite evaluar cómo el incremento del reciclaje y la separación en origen pueden mejorar la sustentabilidad del sistema y evitar su colapso. Según Wong et al. (2020), la dinámica de sistemas puede revelar la no linealidad de los sistemas de gestión ambiental, en los cuales pequeñas intervenciones iniciales (por ejemplo, una mejora de 10 % en separación domiciliaria) pueden generar reducciones acumuladas de hasta 25 % en disposición final después de 10 años, lo cual se ilustra en la simulación donde la separación en origen de 30 % duplicó la vida útil proyectada del relleno sanitario.

La simulación busca dar soporte técnico para la toma de decisiones territoriales, adaptadas a la realidad socioeconómica y operativa de los cantones, de manera que el modelo sirva como herramienta predictiva para planificar inversiones, definir estrategias de

valorización y priorizar intervenciones de bajo costo y alto impacto, en línea con los hallazgos de Richard et al. (2021), quienes demostraron que los modelos dinámicos aplicables a la gestión de residuos en Bogotá optimizan la relación entre infraestructura instalada, eficiencia de separación y reducción de emisiones, alcanzando un 74,5 % de aprovechamiento en escenarios combinados de reciclaje y compostaje.

3. JUSTIFICACIÓN

El manejo de los residuos sólidos es uno de los retos más urgentes a nivel mundial. La generación de desechos ha crecido de manera constante debido a la vertiginosa expansión demográfica, al crecimiento urbano y a la demanda masiva, lo que supone una amenaza para la sostenibilidad ambiental y social. Según reportes recientes, en 2023 se produjeron cerca de 2,1 mil millones de toneladas de residuos sólidos municipales. Si las tendencias actuales continúan, esta cantidad podría llegar a ser aproximadamente de 3,8 mil millones de toneladas para el año 2050 (UNEP, 2024). A pesar de algunos progresos en compostaje y reciclaje, todavía existe una brecha significativa entre la cantidad de residuos generados y los volúmenes que realmente se valoran, lo cual demuestra que es necesario robustecer los sistemas de gestión.

La UNEP (2024) también señala que este aumento en la producción de desechos conlleva un costo económico elevado. Se calculó que el gasto directo mundial para la gestión de residuos en 2020 fue de 252.000 millones de dólares. Si se toman en cuenta los costos indirectos relacionados con la contaminación, las repercusiones sobre la salud y las consecuencias del cambio climático, la cifra aumenta a 361.000 millones de dólares. La necesidad de crear y aplicar políticas integrales que unan la eficiencia económica, el compromiso medioambiental y la innovación tecnológica, con el objetivo de minimizar los residuos producidos y aliviar las consecuencias de una gestión deficiente, es resaltada por estos datos. En este marco, las evaluaciones completas que incluyan la participación de los ciudadanos, el fortalecimiento de las instituciones y la inclusión progresiva de tecnologías emergentes son cruciales para establecer la gestión de residuos como un instrumento eficaz para proteger el medio ambiente y fomentar el desarrollo sostenible.

La administración de desechos sólidos es considerada un asunto clave para la sostenibilidad territorial en el cantón Pelileo. A pesar de los programas de separación en la fuente y compostaje, las restricciones técnicas, ambientales y sociales obstaculizan una gestión completamente apropiada. Según Ambuludí et al. (2022), las debilidades continúan en la

recolección, los procesos de valorización y los mecanismos de comunicación con la población, lo que aumenta el estrés sobre el relleno sanitario y disminuye las posibilidades de recuperar materiales. La generación continua de desechos, junto con una eficiencia logística aproximada del 36,6 %, pone de manifiesto la necesidad de fortalecer los sistemas actuales. Aunque el GAD de Pelileo y EMMAIT-EP han conseguido transformar cerca del 25 % de la fracción orgánica en compost, el 75 % que queda sigue siendo enviado al relleno sanitario sin tratamiento previo, desperdiciando incluso su capacidad energética.

No solamente se requiere un diagnóstico minucioso del sistema actual y sus principales falencias, sino también la inclusión de perspectivas prospectivas que favorezcan la elaboración de políticas públicas y posibiliten prever potenciales caminos futuros (Anzules et al., 2021). La comparación y el análisis de escenarios se han establecido como instrumentos útiles para valorar las repercusiones en términos económicos, sociales y ambientales de diferentes opciones de gestión de residuos; una variedad de investigaciones actuales indica que esta clase de modelación ayuda a calcular huellas de carbono, a evaluar posibilidades de valorización y a reconocer estrategias más sostenibles (Batista, 2024).

En este contexto, el estudio se basa en cuatro escenarios de gestión que simulan el comportamiento del sistema mancomunado Pelileo-Patate ante distintos niveles de separación y valorización de residuos, escenarios adaptados de la metodología planteada por J. Rodríguez & Ibarra (2019), quienes proponen la simulación de escenarios escalonados para medir el impacto de las políticas de gestión en la sostenibilidad de los sistemas municipales, donde los cambios en la separación en origen y el aprovechamiento permiten proyectar la vida útil del relleno sanitario, la tasa de recuperación y la generación de residuos aprovechables en condiciones de crecimiento poblacional y generación constante. En esta investigación, la adaptación de dicho esquema se adapta a las condiciones operativas y socioambientales de los cantones Pelileo y Patate, según la información empírica recogida en las campañas de caracterización y la simulación dinámica en Vensim. Los escenarios planteados son:

- i. Escenario 1: situación actual del sistema.
- ii. Escenario 2: triplicar la separación en origen (30%) manteniendo el resto de las condiciones del sistema constantes.
- iii. Escenario 3: aumentar el aprovechamiento global de residuos hasta un 20 % del total generado (reciclaje más materia orgánica).

- iv. Escenario 4: escenario optimizado, combinando la triplicación de la separación en origen con un aprovechamiento del 50 % de los residuos totales.

La EMMAIT-EP gestiona un sistema conjunto, por lo que cualquier mejoramiento en la valorización de residuos impacta directamente a las dos regiones. Sin embargo, cada cantón tiene sus propios patrones de generación, composición y gestión de residuos; por ende, es necesario realizar un análisis diferenciado. Por lo tanto, el estudio desarrolla simulaciones de manera independiente para cada cantón, comenzando con Pelileo y luego integrando los parámetros de Patate. Esta perspectiva posibilita una proyección más integral de la actuación del sistema mancomunado y del relleno sanitario compartido, proporcionando componentes técnicos que guían las decisiones de planificación y gestión a medio y largo plazo.

4. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

En la Tabla 1 se especifican los beneficiarios directos e indirectos del proyecto de investigación, siendo las instituciones y actores relacionados con la gestión de residuos en el cantón Pelileo los beneficiarios directos; los indirectos son la población total del cantón y área mancomunada.

Tabla 1. *Beneficiarios del proyecto*

Directos	Indirectos	
GAD Municipal de Pelileo	Población de Pelileo – Patate	
Empresa Municipal Mancomunada de Aseo Integral de los cantones Patate y Pelileo - Empresa Pública (EMMAIT-EP)	Hombres (37.452)	Mujeres (40.324)
Recicladores y actores del manejo de residuos	Total: 77.776 personas	

Nota. Elaboración propia en base al Censo poblacional 2022. INEC (2023). Población por sexo al nacer según provincia, cantón y parroquia de residencia.

5. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

A nivel nacional, la gestión de residuos sólidos en Ecuador enfrenta desafíos estructurales que comprometen la sostenibilidad ambiental y social del país. Según el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (2022), solo el 49% de las grandes ciudades cuenta con cobertura adecuada del servicio de recolección, mientras que en las zonas rurales esta cobertura es prácticamente inexistente. Estas deficiencias en infraestructura y en la prestación de servicios han llevado a prácticas de disposición inadecuadas, como el vertido de residuos en

cuerpos de agua, terrenos baldíos y basureros clandestinos, generando impactos negativos sobre la calidad del suelo, del aire y de los recursos hídricos. Además, estas condiciones han intensificado problemas de salud pública, especialmente en comunidades vulnerables que carecen de alternativas seguras para la disposición de sus residuos (MAATE, 2022).

El Instituto Nacional de Aprendizaje (2021) estima que Ecuador genera aproximadamente 5.3 millones de toneladas de residuos sólidos al año, de los cuales apenas el 20% se recicla. Esto implica que la mayor parte de los residuos termina en vertederos o rellenos sanitarios, contribuyendo a la contaminación ambiental y a la emisión de gases de efecto invernadero, como el metano, que exacerba el cambio climático (Laboratorio de Reciclaje, 2024). En las zonas urbanas, cada habitante produce en promedio 0.9 kg de residuos sólidos al día, lo que suma un total diario de 14,394 toneladas recolectadas a nivel nacional (INEC, 2023). Este panorama evidencia la necesidad urgente de fortalecer los sistemas de gestión integral de residuos para promover la reducción en la generación de desechos y aumentar las tasas de reciclaje y revalorización, elementos clave para avanzar hacia una economía circular.

A pesar de los esfuerzos realizados, el Boletín Estadístico del MAATE (2024) señala que una proporción significativa de los residuos recolectados sigue siendo dispuesta en rellenos sanitarios o, peor aún, en vertederos a cielo abierto. Iniciativas como el Proyecto de Gestión de Residuos Sólidos y Economía Circular Inclusiva (GRECI) buscan establecer bases técnicas y estratégicas para proyectar la generación diaria y anual de residuos en Ecuador, formulando políticas públicas alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

En el aspecto local la recolección de residuos sólidos en el cantón Pelileo presenta una constante proyección del aumento en la producción de desecho. Un escaso aprovechamiento valorizado de estos, lo que afecta significativamente la sostenibilidad ambiental y la eficiencia del servicio municipal, debido a la ausencia de paradigmas sólidos de gestión. Algunos estudios indican que el relleno sanitario Patate-Pelileo emitirá 33 070 236 m³ de metano en sus 20 primeros años de operación, en torno a 1 653 511 m³/año en promedio (con un máximo proyectado de 2032, pero sin que haya actualmente interés por algún aprovechamiento energético de este biogás en electricidad (17 693–53 385 MWh) (Ambuludi et al., 2022). Este desaprovechamiento no solo representa una pérdida de oportunidad para la producción de energía renovable, sino que incrementa la emisión de gases de efecto invernadero al ambiente.

Por otra parte, si bien a partir de 2019 la EMMAIT-EP ha implementado un sistema de separación en la fuente y compostaje que transforma el 25 % de los residuos orgánicos en humus (“*Compostico*”), el 75 % restante sigue vertiéndose sin tratamiento previo, con los riesgos ambientales y sociales que ello supone (Montaguano, 2019).

Por último, y a pesar de la existencia de estas iniciativas puntuales, no se dispone de estudios que utilicen herramientas de simulación y de comparación de escenarios. Esto es necesario para evaluar de manera integral cómo distintas estrategias, ya sea aumento de la separación en la fuente, incremento del aprovechamiento del 20 % o 50 % de los residuos o combinadas, podrían mejorar la sostenibilidad y eficiencia de los sistemas. La literatura internacional indica que comparar diferentes escenarios usando métodos de huella de carbono y dinámicas de sistemas es clave para identificar las opciones con menos impacto climático y mejor viabilidad técnica.

El hecho de no contar con evaluaciones integrales y prospectivas del sistema de gestión de residuos mancomunado Pelileo-Patate dificulta la detección de riesgos tanto operacionales como ambientales. Además, obstaculiza la elección de estrategias para valorar que hagan posible aumentar la sostenibilidad y extender el ciclo útil del relleno sanitario.

6. OBJETIVOS

6.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la efectividad del sistema de gestión integral de residuos mancomunado Pelileo–Patate administrado por EMMAIT-EP mediante dinámica de sistemas en la proyección y comparación de cuatro escenarios de revalorización.

6.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Caracterizar el sistema actual de gestión integral de residuos sólidos del cantón Pelileo, identificando fortalezas, debilidades, y áreas críticas de mejora.

Diseñar un modelo basado en la dinámica de sistemas para proyectar y analizar escenarios futuros de valorización de residuos en el territorio.

Analizar la eficacia de cuatro escenarios de gestión en términos de separación en la fuente, incremento de reciclaje y aprovechamiento, utilizando indicadores clave de sostenibilidad.

6.3 ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN CON LOS OBJETIVOS PLANTEADOS

La Tabla 2 muestra la relación entre los objetivos específicos, las actividades, los métodos aplicados y los resultados esperados del estudio. Esta organización permite evidenciar la coherencia metodológica del proceso investigativo, desde la caracterización del sistema actual de gestión de residuos hasta la simulación de escenarios futuros mediante dinámica de sistemas. Cada actividad se vincula con un método científico adecuado, garantizando un enfoque sistemático para el análisis y proyección de la gestión integral de residuos mancomunada.

Tabla 2. *Actividades y sistema de tarea de los objetivos*

Objetivo Específico	Actividades	Métodos	Resultados Esperados
Caracterizar el sistema actual de gestión integral de residuos del relleno sanitario del cantón Pelileo	Detallar cantidad y tipo de residuos.	Método de cuarteo	Caracterización de los residuos sólidos.
	Identificar los puntos de recolección de residuos sólidos distribución. Examinar la presencia y uso de eco tachos. Identificar las condiciones de disposición final y reciclaje.	Método inductivo – Observación directa Método inductivo – Observación directa Método analítico-sintético – Revisión documental	
Diseñar un modelo basado en la dinámica de sistemas para proyectar y analizar escenarios futuros de valorización de residuos en el territorio.	Realizar un análisis FODA del sistema.	Método inductivo – Observación directa	Modelo causal del sistema. Simulación de 4 escenarios de gestión de residuos.
	Recopilar datos sobre generación y gestión de residuos sólidos a partir de registros de la EMMAIT-EP.	Método bibliográfico y analítico-sintético – Revisión documental y análisis de datos secundarios	
	Diseñar un diagrama causal Estructurar las variables el modelo en el software Vensim. Definir y estructurar ecuaciones matemáticas para la simulación. Ejecutar las ecuaciones para evaluar el impacto de cada escenario.	Dinámica de Sistemas (Vensim) Método analítico-sintético Método deductivo Método analítico-sintético	
Analizar la eficacia de cuatro escenarios de gestión en términos de separación en la fuente, incremento de reciclaje y aprovechamiento, utilizando indicadores clave de sostenibilidad.	Identificar variables clave del sistema de gestión de residuos (generación, reciclaje, disposición final).	Método analítico-sintético	Representación gráfica del modelo y determinación del mejor escenario.
	Analizar el comportamiento del sistema bajo los 4 escenarios definidos.	Método deductivo – Dinámica de sistemas (Vensim)	
	Validar el modelo con expertos y actores clave del sector. Proyectar escenarios futuros de valorización de residuos a 10 años.	Método participativo Método analítico-sintético y participativo	

Fuente. Elaborado por Camacho J. & Paredes K. (2025).

7. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICA

7.1 Residuos sólidos

Los residuos sólidos son uno de los principales problemas ambientales relacionados con el crecimiento poblacional, la urbanización y los cambios en los patrones de consumo, y su generación y manejo inapropiado impactan suelo, agua y aire, generan riesgos a la salud pública y altos costos sociales y económicos (Herrera et al., 2023; Najjar, 2024).

Conceptualmente, los residuos sólidos son materiales de desecho generados por actividades domésticas, comerciales, industriales y de servicios que requieren sistemas apropiados de recolección, tratamiento y disposición final (Mohanty et al., 2022). El manejo de estos residuos se relaciona con el desarrollo sustentable, que se define como la integración de las dimensiones ambiental, social y económica.

El desarrollo sustentable se asocia a las ciencias sociales, económicas y políticas, y se enfoca en la conservación de los recursos naturales se enfoca en la conservación de los recursos naturales, utilizándolos de manera racional y controlada (Reyes et al., 2023); el desarrollo sustentable es un crecimiento controlado con medidas políticas y sociales para el uso eficiente de los recursos del planeta (Oettinger, 2022).

7.1.1 Jerarquización de residuos

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos diseñó una jerarquía para la gestión de residuos sólidos, que destaca esta diversidad de enfoques (Figura 2). Esta jerarquía clasifica de forma general las estrategias de manejo de residuos, priorizando aquellas que son más sostenibles desde el punto de vista ambiental, como la reducción, la reutilización y el reciclaje.

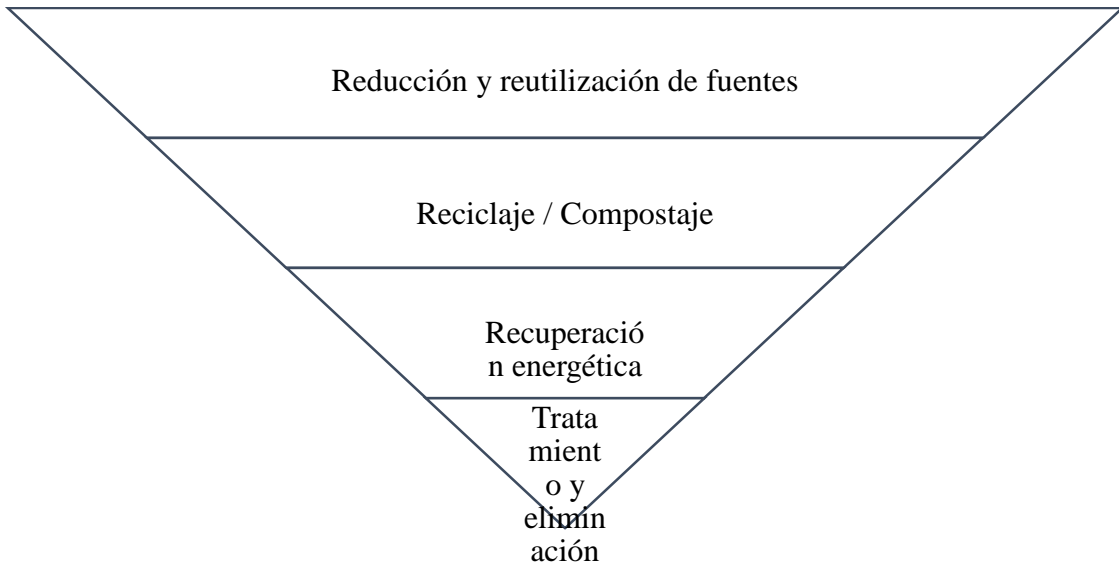


Figura 1. Jerarquía para la gestión de residuos sólidos

Nota. En la jerarquía de gestión de residuos sólidos, la reutilización en la fuente es la estrategia más aplicada debido a su enfoque preventivo y sostenible. En contraste, el tratamiento y la eliminación son las menos utilizadas, ya que representan mayores costos y un impacto ambiental más significativo (EPA EE.UU, 2017).

La jerarquía de gestión de residuos sólidos establece un enfoque estructurado para minimizar el impacto ambiental de los residuos. Cada nivel de la jerarquía representa una estrategia específica, desde la prevención hasta la disposición final, destacando su relevancia ecológica y económica. La tabla 3 a continuación detalla las principales estrategias de gestión y sus características clave.

Tabla 3. Elementos de la jerarquía de gestión de residuos sólidos

Nivel de la Jerarquía	Descripción	Beneficios Clave
Reducción y Reutilización	Prevención de la generación de residuos mediante el uso de productos duraderos y reutilizables.	Disminución de residuos generados, ahorro de recursos y costos.
Reciclaje y Compostaje	Conversión de materiales reciclables en nuevas materias primas o compostaje de residuos orgánicos.	Menor uso de vertederos, reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.
Recuperación Energética	Transformación de residuos no reciclables en energía utilizable.	Generación de energía, reducción del volumen de residuos.
Tratamiento y Eliminación	Tratamiento físico, químico o biológico para minimizar la toxicidad y disposición en vertederos seguros.	Reducción del impacto ambiental y aprovechamiento del metano.

Nota. Elaborado por Camacho J. & Paredes K. (2025).

La gestión integral de los residuos sólidos necesita un enfoque integrado que vaya más allá de los aspectos técnicos e involucre factores sociales, institucionales y económicos, por lo que el modelo se basa en la articulación de acciones estratégicas en seis áreas de sostenibilidad: sociocultural, tecnológica, política y jurídica, organizacional, ambiental y económico-financiera, las cuales permiten intervenir sobre las causas estructurales del problema de los residuos sólidos y generar soluciones efectivas y sostenibles en el tiempo. Según Chandratreya (2025), la articulación de estas dimensiones asegura la participación comunitaria, el uso de tecnologías adecuadas, políticas equitativas y la estabilidad económica del sistema, las cuales son determinantes para establecer una gestión ambientalmente responsable y socialmente inclusiva. En la Tabla 4 se resumen las principales dimensiones de sostenibilidad que fortalecen los sistemas integrales de gestión de residuos sólidos.

Tabla 4. *Ámbitos de sostenibilidad en gestión de residuos sólidos*

Enfoque	Descripción
Político-Jurídico	Asegura la viabilidad política de los procesos mediante el apoyo de autoridades locales. Promueve el desarrollo participativo de políticas que facilitan la gestión del servicio, estableciendo regulaciones en espacios públicos, tarifas, entre otras, para garantizar mayores niveles de cumplimiento y apropiación.
Organizacional	Fortalece la estructura orgánica de los municipios u organizaciones comunitarias para la operación, mantenimiento y administración del sistema de residuos sólidos. Se basa en capacidades locales, recursos disponibles y las necesidades de los actores involucrados, vinculándose directamente con los aspectos políticos y jurídicos.
Sociocultural	Prioriza la participación comunitaria como principio fundamental, promoviendo actividades de educación, comunicación y promoción. Se incluyen criterios de equidad de género y generacional, involucrando a niños, jóvenes, mujeres y familias en todas las fases del proceso, desde el diagnóstico hasta la evaluación, respetando la diversidad cultural y poblacional.
Tecnológico	Garantiza el uso de diseños, tecnologías y alternativas adecuadas para todas las etapas del sistema de gestión de residuos sólidos. Se incluye la generación, disposición y tratamiento final, además del fortalecimiento de capacidades técnicas en líderes y comunidades para asegurar una gestión integral efectiva.
Ambiental	Implementa acciones para mitigar impactos negativos y generar beneficios ambientales, como proteger el agua, suelo y aire mediante el control de lixiviados, gases y olores. Promueve el cierre de botaderos inadecuados y fomenta la reflexión comunitaria para adoptar prácticas ambientalmente aceptables en la gestión de residuos.
Económico-Financiero	Define tarifas equitativas y diferenciadas que cubran los costos de operación, mantenimiento y reposición del sistema, reduciendo gradualmente los subsidios. Incluye convenios entre comunidades y gobiernos locales para la administración

del servicio, tomando en cuenta la capacidad y voluntad de pago de las comunidades.

Nota. La tabla resume los principales enfoques que articulan la gestión integral de residuos sólidos, cada uno de los cuales es clave para garantizar un sistema eficiente, sostenible y adaptado a las necesidades locales.

7.1.2 Principios de la gestión de residuos sólidos

La gestión integral de residuos sólidos se debe guiar por principios que involucren factores ambientales, sociales, económicos y organizativos para garantizar su sostenibilidad; estos orientan la planificación y operación del sistema, previniendo, valorizando y corresponsabilizando a la ciudadanía en las diferentes etapas del manejo de residuos, como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Principios de la gestión de residuos sólidos

Categoría	Principios
Técnicos	<ul style="list-style-type: none"> • Emplear tecnología de fácil implementación y mantenimiento. • Minimizar la generación y capacidad contaminante de los residuos. <ul style="list-style-type: none"> • Utilizar diseños viables de procesos y productos. • Incorporar recursos humanos y materiales locales. • Adecuar y diseñar normas y estándares que garanticen una GIRSM adecuada.
Sociales	<ul style="list-style-type: none"> • Ubicar soluciones de almacenamiento, tratamiento y disposición final lo más cerca posible de las fuentes de generación. • Atender eficientemente las demandas del servicio de aseo público. • Fomentar hábitos positivos y desalentar los negativos en la población. <ul style="list-style-type: none"> • Promover la participación y la organización comunitaria. • Informar e involucrar oportunamente a la ciudadanía en el diseño e implementación de sistemas de manejo de residuos. • Asegurar que los costos de inversión, operación y mantenimiento sean sostenibles.
Económicos	<ul style="list-style-type: none"> • Implementar alternativas económicas que beneficien al sector y a los actores involucrados. • Contribuir al fortalecimiento de otras actividades económicas locales. • Diseñar sistemas de administración y manejo simples y dinámicos. • Garantizar el respaldo político de las autoridades municipales para los cambios necesarios.
Organizativos	<ul style="list-style-type: none"> • Contextualizar las acciones dentro del marco político, social y económico del municipio. • Hacer responsables a los generadores de contaminación por sus consecuencias.
Sanitarios y Ambientales	<ul style="list-style-type: none"> • Integrar la gestión integral a programas de prevención de enfermedades infecciosas. • Abarcar todas las etapas del manejo de residuos, evitando transferencias de contaminantes entre medios.

-
- Prevenir y mitigar los impactos negativos en el suelo, agua y aire.

Nota. Adaptado de Rodríguez et al. (2021). Guía para la Gestión Integral de Residuos Sólidos Municipales.

7.1.3 Enfoques de la gestión integral de residuos sólidos

No existe un enfoque único en la gestión de residuos sólidos que sea adecuado para manejar todos los materiales y flujos de desechos bajo cualquier circunstancia. Por ello, los gobiernos locales deben desarrollar planes adaptados a las necesidades y condiciones específicas de sus territorios. En este contexto, planteamos algunos enfoques ajustados a la investigación:

7.1.4 Economía circular y valorización de residuos sólidos

La economía circular sostenible, en contraposición al modelo de economía lineal o de flujo continuo, redefine profundamente el ciclo económico al centrarlo en la integración entre economía y ecología. Este enfoque transita del simple equilibrio entre oferta y demanda hacia una relación armónica con el medioambiente, adoptando tecnologías inspiradas en la naturaleza en lugar de explotarla directamente (A. García et al., 2023).

La creciente generación de residuos sólidos, que impacta negativamente el medioambiente, ha llevado a gobiernos federales y locales a implementar medidas para mitigar este problema. En este contexto, la transición de una economía lineal a una economía circular se presenta como una alternativa sostenible. Un análisis sobre la gestión integral de residuos sólidos municipales en el contexto peruano, basado en una revisión documental, evidenció un aumento significativo en la producción de residuos y los costos asociados a su manejo. Asimismo, se identificaron esfuerzos conjuntos para perfeccionar políticas y estrategias que promuevan un desarrollo sostenible e inclusivo, mejorando la calidad de vida de los ciudadanos (Jiménez, 2022).

Desde una perspectiva estratégica, la economía circular ofrece soluciones innovadoras a los desafíos ambientales y sociales más apremiantes. Fomenta nuevos flujos basados en la reutilización, restauración y renovación de recursos, promoviendo prácticas como la reducción, recuperación, reciclaje y aprovechamiento de materiales y energía. Este modelo no solo alinea los objetivos organizacionales con la sostenibilidad, sino que también impulsa un cambio estructural hacia un desarrollo más consciente y responsable (A. García et al., 2023).

Así mismo, el Ministerio de Ambiente y el Ministerio de Producción destacan que, la economía circular (EC) es un enfoque innovador de producción y consumo que busca regenerar y restaurar los ecosistemas al prevenir la generación de residuos desde su concepción. Este modelo fomenta la reutilización, reparación, renovación y reciclaje de materiales y productos existentes, maximizando su vida útil y contribuyendo a un desarrollo más sostenible y eficiente.

La Figura 2 resume los principios de la economía circular (EC) que guían la transformación de un modelo lineal (extraer, producir, consumir, desechar) a uno regenerativo y restaurativo. En este modelo se busca preservar el valor de los recursos, mantener los productos y materiales en uso por más tiempo y minimizar la generación de residuos a través de la reutilización, reparación y el reciclaje, según el MAATE y el MIPRO (2024).

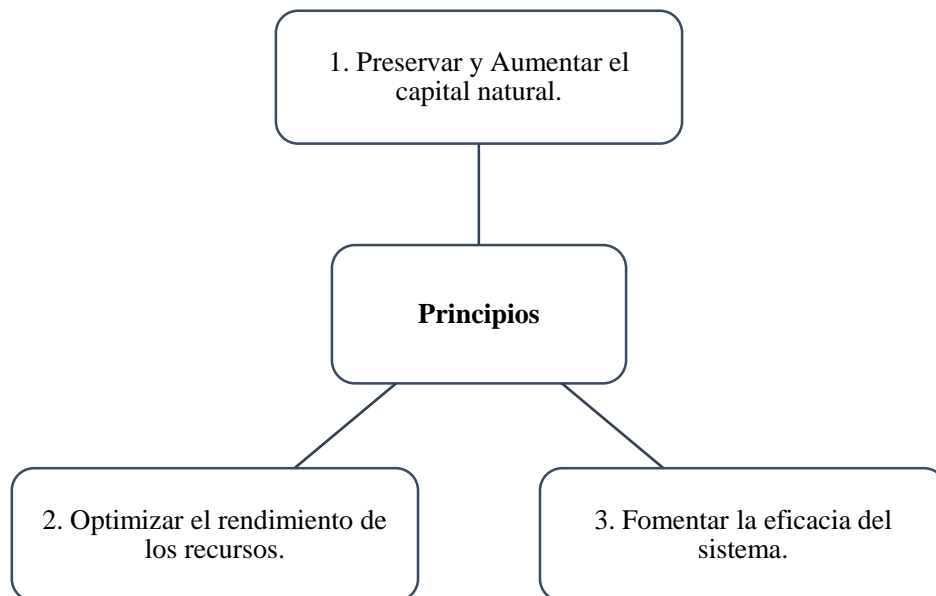


Figura 2. Principios de la economía circular

Fuente. Elaborado por Camacho J. & Paredes K. (2025).

7.2 Tipos de residuos sólidos

La clasificación adecuada de los residuos sólidos es fundamental para establecer estrategias de aprovechamiento y valorización en los sistemas integrales de gestión. En ese contexto, en la Tabla 6 se resumen los principales materiales reciclables, sus usos y beneficios ambientales y energéticos, información útil para direccionar programas de recuperación y reciclaje en los cantones mancomunados.

Tabla 6. Materiales reciclables

Material	Descripción y Aplicaciones
Papel	Transformado en productos como papel reciclado, cinta, vendajes o aislamiento.
Aluminio	Ideal para reciclaje continuo sin pérdida de calidad; ahorra más del 90% de energía frente a la producción de aluminio nuevo.
Acero	Material más reciclado a nivel mundial; reutilizado en construcción, vehículos y otros productos, ahorrando hasta un 74% de energía.
Plásticos	Reutilizables en mobiliario, bloques de cemento y madera plástica; contribuyen a reducir problemas ambientales al degradarse lentamente.
Baterías	Diversos tipos como alcalinas y de litio reciclados en instalaciones especializadas para evitar contaminación y riesgos de incendios.
Vidrio	Mantiene su calidad indefinidamente, permitiendo su refabricación o reutilización directa como contenedores.
Aceite de motor usado	Purificado para reutilización como lubricante, combustible o materia prima.
Neumáticos	Empleados en ingeniería civil, asfalto o como combustible alternativo, con ciertas preocupaciones ambientales.
Residuos electrónicos	Contienen metales y plásticos valiosos, cuyo reciclaje genera notables beneficios económicos y ambientales.

Nota. Adaptado de EPA EE.UU, (2017). Mejores prácticas para la gestión de los residuos sólidos: Una Guía para los responsables de la toma de decisiones en los países en vías de desarrollo. Oficina de Conservación y Recuperación de Recursos.

Por otra parte, en la Tabla 7 se muestra la clasificación de los residuos sólidos según la norma ASTM D 5231-92, de referencia internacional para el análisis de composición y caracterización de residuos municipales, la cual permite estandarizar la forma de clasificarlos para facilitar la segregación y planificar las etapas de tratamiento y disposición final.

Tabla 7. Categorías de los desechos sólidos

Categoría	Descripción
Papel	Incluye papeles de oficina, computadoras, revistas, papel satinado, encerado y otros papeles que no sean periódicos.
Vidrio	Comprende todos los tipos de vidrio y cristal.
Cartón ondulado	Cajas de cartón corrugado, papel marrón y otros materiales de cartón ondulado.
Metales ferrosos	Materiales como hierro, acero, latas metálicas y bimetálicas.
Aluminio	Latas de aluminio, papel de aluminio y otros productos derivados del aluminio.

Desechos orgánicos	Residuos alimenticios, excluyendo huesos.
Madera	Productos de madera como paletas, muebles y residuos derivados de la madera.
Inorgánicos no combustibles	Materiales como rocas, arena, cerámica, suciedad, metales no ferrosos, aluminio, huesos, entre otros.

Nota. Adaptado de ASTM International (2016). Standard Test Method for Determination of the Composition of Unprocessed Municipal Solid Waste. ASTM International.

7.2.1 Métodos de caracterización

El método de cuarteo es una técnica utilizada para caracterizar y cuantificar residuos sólidos de manera representativa y homogénea. Consiste en recolectar una muestra de aproximadamente 90 kg de residuos desde el sitio de origen (almacenamiento, camión recolector, etc.) y distribuirla en un círculo de 1.5 m de radio dividido en cuatro cuadrantes. Tras homogenizar los residuos en el círculo, se seleccionan dos cuadrantes opuestos para clasificar los materiales por tipo (plástico, vidrio, papel, etc.) y verificar la homogeneidad mediante el pesaje, asegurando que la diferencia entre cuadrantes no supere los 2 kg. Si es necesario, se incorporan los cuadrantes restantes hasta garantizar la uniformidad de la muestra. Finalmente, se calculan los promedios y porcentajes de composición, y el área se limpia para dejarla en condiciones iniciales. Este proceso, apoyado por herramientas como básculas, guantes y bolsas, permite obtener datos precisos sobre la composición de residuos en diversos sectores (Alayón, 2020).

Además del método de cuarteo, otro enfoque para la caracterización de residuos sólidos incluye los métodos de estimación, que pueden ser directos o indirectos.

Los métodos indirectos se enfocan en calcular el Índice de Generación Per cápita (IGP) y la densidad utilizando datos globales sin clasificaciones específicas. Este índice se obtiene relacionando la cantidad de residuos recolectados o dispuestos con la población servida, permitiendo identificar discrepancias en los cálculos y analizar su impacto ambiental. Por otro lado, los métodos directos permiten determinar características más específicas, como composición y densidad, mediante la recolección de muestras representativas de residuos en diferentes estratos sociales y estaciones del año. Se emplean recipientes de 200 litros para medir densidad y peso/volumen, complementados con mediciones en vehículos recolectores y vertederos. Estos datos son esenciales para diseñar sistemas eficientes de gestión integral de

residuos sólidos municipales, planificando equipamientos, rutas y estrategias de reciclaje o tratamiento (N. Rodríguez et al., 2021).

Estudios recientes sobre muestreo ambiental Biglari et al. (2022) indican que, a pesar de que existen métodos mecánicos más caros, el cuarteo manual sigue siendo una opción viable si se controla la segregación (el material fino que se va al fondo del cono) y se trabaja en superficies limpias y duras. Su principal ventaja es que es fácil de usar y causa poca alteración física de la fracción retenida. La limitación más mencionada es la necesidad de tener mucho espacio y personal capacitado para evitar errores por derrames o pérdida de partículas pequeñas. En investigaciones de calidad de suelos de páramo o residuos sólidos, el cuarteo garantiza que la submuestra conserve la proporción natural de materia orgánica, humedad y granulometría, parámetros críticos para la correcta caracterización físico-química de la matriz ambiental.

Autores como Yectzin et al. (2022) destacan su uso en contextos rurales de Latinoamérica, debido a su bajo costo, fácil aplicación en campo y buena precisión cuando es realizado correctamente. No obstante, también advierten que, si no se realiza sobre superficies limpias y niveladas, o si el material no está adecuadamente homogeneizado, pueden producirse errores sistemáticos por pérdida de partículas finas o segregación gravitacional.

En el caso de estudios en rellenos sanitarios o zonas degradadas, el cuarteo resulta útil para tomar submuestras representativas de compost, residuos semisólidos o materiales recuperados, permitiendo estimar con precisión parámetros como contenido de humedad, metales pesados, carbono orgánico, densidad aparente o composición granulométrica (Yaparadne et al., 2022).

7.2.1.1 Formulas aplicadas en el cuarteo

Promedio por el tipo de residuo: se utiliza para calcular un valor representativo que permite analizar y comparar diferentes tipos de desechos generados.

$$\text{Promedio por Tipo de Residuo} = \frac{\text{Kg Cuadrante I} + \text{Kg Cuadrante III}}{2}$$

Porcentaje: Se calcula el porcentaje respecto al total.

$$\text{Porcentaje por semana} = \frac{\text{Kg por tipo de residuos}}{\text{Kg promedio de residuos recolector} } * 100$$

Producción: Se calcula con base en los valores obtenidos de promedio y porcentaje.

$$\text{Porcentaje} = (\% \text{ tipo de residuo}) * \text{Kg total de residuos por semana}$$

7.2.2 Etapas del método de cuarteo de residuos

El método de cuarteo se utiliza para obtener muestras representativas y homogéneas de residuos sólidos y garantizar la exactitud de su caracterización física y composicional; es un proceso para disminuir el tamaño de la muestra sin cambiar la proporción de sus materiales. En la Tabla 8 se ilustran los pasos del método de cuarteo, según la norma ASTM D75-03, de referencia en la toma de muestras ambientales.

Tabla 8. *Etapas del método de cuarteo*

Etapas	Descripción
1. Homogeneización	Se mezcla completamente el material para garantizar una distribución uniforme de sus componentes.
2. Formación del cono	El material se deposita en forma de cono sobre una superficie limpia y nivelada.
3. Aplanamiento del cono	El cono se aplasta cuidadosamente hasta formar un círculo uniforme de grosor regular.
4. División en cuatro partes	El círculo se divide en cuatro sectores iguales en forma de cruz.
5. Eliminación alterna	Se eliminan dos sectores opuestos (diagonalmente) y se conservan los dos restantes.
6. Repetición del proceso	Los pasos anteriores se repiten sucesivamente hasta alcanzar la cantidad deseada.
7. Envasado	La submuestra final se coloca en un recipiente limpio y rotulado para análisis.

Fuente. ASTM International (2016). Standard Practice for Sampling Aggregates (ASTM D75–03). West Conshohocken, PA: ASTM International.

7.2.2.1 Separación en la fuente

La separación de residuos en el lugar de origen es una práctica clave que favorece un reciclaje más eficiente y asegura una materia prima más pura para el tratamiento de desechos orgánicos. La eficacia de los programas de segregación en origen se incrementa significativamente cuando se complementan con campañas educativas y de sensibilización dirigidas tanto a los generadores de residuos como al personal encargado de la recolección. Además, para garantizar el éxito de estas iniciativas, es fundamental que los gobiernos locales proporcionen la infraestructura necesaria, como contenedores o recipientes diseñados para

clasificar las diferentes categorías de desechos (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, 2020).

Así mismo, Rodríguez et al. (2021) manifiestan que clasificar los residuos sólidos en el lugar donde se generan, como hogares, industrias y comercios, facilita su recuperación y aprovechamiento. En países en desarrollo, esta clasificación suele dividirse en orgánicos e inorgánicos: los orgánicos pueden transformarse en abonos, biogás u otros recursos útiles, mientras que los inorgánicos, al conservar sus propiedades, son reutilizables en la industria. Este proceso previene la contaminación cruzada, optimiza el reciclaje y fomenta la sostenibilidad.

Además, la implementación de programas de separación en la fuente ha demostrado ser efectiva en diversas regiones. Por ejemplo, en Navarra, España, se alcanzó una tasa de recogida separada del 43,3% en 2022, la más alta de España, lo que evidencia el impacto positivo de estas iniciativas en la gestión de residuos (Pamplona, 2025).

Adicionalmente, la separación en la fuente es una forma de hacer más eficiente el sistema integral de manejo de residuos, al reducir la cantidad de materiales mezclados que tienen que ser separados y procesados, optimizando recursos y disminuyendo costos operativos, al evitar requerir infraestructura para separarlos posteriormente. En la Tabla 9 se resumen las etapas operativas de la separación en la fuente, con las responsabilidades de los generadores, recolectores y disposición en contenedores comunitarios, de acuerdo con la EPA (2020).

Tabla 9. *Etapas de la separación en la fuente*

Etapas	Descripción
Generadores de residuos	Utilizar contenedores codificados por colores: verde para orgánicos, blanco para reciclables y negro para desechos no reciclables.
Recolectores de residuos	Separar los residuos en bolsas o compartimentos, diferenciando reciclables, orgánicos y otros desechos, para su posterior tratamiento adecuado.
Contenedores comunitarios especializados	Implementar contenedores comunales codificados por colores en áreas residenciales, asignando un color específico para cada tipo de residuo: papel, orgánicos, vidrio, empaques reciclables y otros desechos.

Nota. Adaptado de EPA EE.UU (2020). Mejores prácticas para la gestión de los residuos sólidos: Una Guía para los responsables de la toma de decisiones en los países en vías de desarrollo. Oficina de Conservación y Recuperación de Recursos.

7.2.2.2 Recolección

El término "recolección" abarca no solo la recogida, ya sea manual o mecanizada, de los residuos almacenados en las fuentes generadoras, sino también su transporte hacia los sitios de tratamiento o disposición final. Este proceso constituye el enlace esencial entre el almacenamiento de residuos y su disposición final. Para garantizar un servicio eficiente y equitativo, la recolección debe organizarse de manera que evite la generación de malos olores, polvo, desorden o ruidos molestos (N. Rodríguez et al., 2021).

MAATE & MIPRO (2024) lo destaca como un acción que consiste en retirar, recoger y depositar los residuos sólidos no peligrosos en los equipos o vehículos destinados a su transporte hacia estaciones de transferencia, instalaciones de aprovechamiento, o sitios designados para su disposición final. Este proceso asegura una gestión adecuada y eficiente de los desechos, facilitando su posterior tratamiento o eliminación.

Existen diversos métodos para la recolección de residuos, cada uno adaptado a las necesidades y características de la comunidad. El método puerta a puerta no requiere puntos de recolección públicos, ya que los vehículos recorren lentamente las calles, deteniéndose en cada vivienda donde se hayan dispuesto los residuos, una práctica efectiva cuando la población respeta los horarios establecidos. En contraste, el método de esquina utiliza contenedores estratégicamente ubicados en puntos comunes, diseñados considerando factores como la generación de residuos, densidad poblacional y accesibilidad vial, permitiendo a los vehículos recoger únicamente en esos puntos. Por último, el método mixto combina ambos enfoques según la disponibilidad de equipos y frecuencia requerida, priorizando la recolección más frecuente de residuos orgánicos y permitiendo un almacenamiento más prolongado de materiales reciclables, dependiendo de la composición de los residuos y el compromiso ciudadano con la separación en origen Rodríguez et al. (2021). En la Tabla 10 se comparan los principales métodos de recolección puerta a puerta y comunal, con sus características operativas, ventajas, desventajas y potencial de mejora tecnológica.

Tabla 10. *Etapas de la recolección*

Aspecto	Recolección Puerta a Puerta	Recolección Comunal
Descripción	Los residuos son recogidos directamente en cada hogar. Los recolectores alertan a los residentes mediante campanas o	Los residuos son llevados por los residentes a grandes contenedores ubicados estratégicamente en el

	anuncios para que saquen sus residuos a la calle en horarios predefinidos.	vecindario, y posteriormente son recogidos por vehículos municipales.
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Conveniencia para los residentes. <ul style="list-style-type: none"> • Recolección consistente. • Posibilidad de incorporar tecnologías como códigos QR para optimizar el proceso. 	<ul style="list-style-type: none"> • Menor frecuencia de paradas para los vehículos. <ul style="list-style-type: none"> • Reducción de residuos almacenados en los hogares. • Posibilidad de incorporar tecnología inteligente para monitorear contenedores.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Costos elevados por las frecuentes paradas. <ul style="list-style-type: none"> • Dificultades en áreas con accesibilidad limitada. • Pérdida de recolección si los residentes no están en casa. • Posible vertido o quema ilegal por poca frecuencia. 	<ul style="list-style-type: none"> • Riesgo de vertido o quema ilegal si los contenedores están mal ubicados. • Posibilidad de daño por animales si los contenedores no son adecuados. • Necesidad de alta participación ciudadana.
Aplicación Ideal	Áreas residenciales con alta densidad y óptima accesibilidad para los vehículos.	Vecindarios con densidad media-alta y suficiente espacio para la instalación de contenedores comunes.
Optimización con Tecnología	Uso de aplicaciones o sensores para monitorear horarios de recolección y facilitar el cumplimiento ciudadano.	Sensores en los contenedores para avisar cuando están llenos, optimizando los viajes de recolección y reduciendo costos.

Nota. Adaptado de EPA EE.UU (2020). Mejores prácticas para la gestión de los residuos sólidos: Una Guía para los responsables de la toma de decisiones en los países en vías de desarrollo. Oficina de Conservación y Recuperación de Recursos.

En áreas de difícil acceso o con pendientes pronunciadas, es fundamental utilizar contenedores especialmente diseñados para facilitar la evacuación de los residuos. Además, esta etapa suele representar entre el 60 % y el 70 % del costo total de un sistema integrado de gestión de residuos sólidos municipales (Rodríguez et al., 2021).

7.2.2.3 Reciclaje y aprovechamiento

El reciclaje se considera un proceso que implica la separación, clasificación y tratamiento selectivo de los residuos o sus componentes, con el propósito de transformarlos en materia prima para la fabricación de nuevos productos. Este procedimiento no solo permite reducir la cantidad de residuos enviados a los vertederos, sino también disminuir la extracción de recursos naturales y fomentar un modelo de economía circular que promueva la sostenibilidad ambiental (MAATE & MIPRO, 2024).

El reciclaje consiste en una serie de actividades que desvían materiales que podrían convertirse en residuos, separándolos, recolectándolos y procesándolos para utilizarlos como materia prima en la fabricación de nuevos productos. Aunque es una herramienta clave en la gestión de residuos, no puede considerarse como la única solución, ya que no todos los materiales son reciclables desde una perspectiva técnica o económica. Su principal objetivo es recuperar componentes específicos de los residuos, lo que contribuye a ahorrar recursos naturales, reducir el volumen de desechos a disponer, y generar beneficios ambientales, como el ahorro energético y la disminución de la contaminación del aire, agua y suelo (A. Rodríguez & Baca, 2022).

Así mismo, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (2020), considera que, el reciclaje implica recolectar y procesar materiales descartados como residuos, transformándolos en nuevos productos útiles los cuales se presentan en la Tabla 6.5.

El tratamiento de residuos sólidos municipales (RSM) implica su transformación en instalaciones especializadas, empleando tecnologías adecuadas según el volumen y las demandas del mercado para los productos resultantes. Algunos RSM requieren tratamiento tanto para aprovechar sus beneficios como para reducir sus impactos ambientales. Los residuos orgánicos, por su carácter putrescible, pueden generar graves efectos negativos en el ambiente y la salud; sin embargo, su recuperación permite obtener productos de valor como compost, humus o biogás. Este último puede ser utilizado como combustible alternativo o convertido en energía eléctrica para uso local. Por otro lado, los escombros de actividades constructivas, tras ser triturados con equipos específicos, pueden reutilizarse en la propia construcción o en otras aplicaciones locales, promoviendo la sostenibilidad (N. Rodríguez et al., 2021).

El tratamiento y valorización de residuos sólidos representan un eje clave en la gestión sostenible de los desechos, destacando la necesidad de enfoques metodológicos mixtos que combinen investigación cualitativa y cuantitativa. Según Cervantes et al. (2020), la valorización de residuos sólidos constituye una tendencia mundial que impulsa innovadoras tecnologías como la evaporación por plasma, considerada una solución rentable y eficiente (Briseño et al., 2020). En este marco, Foradori (2020) enfatizan que la gestión integral de residuos debe ser un ciclo completo que aborde dimensiones sociales, ambientales, políticas y económicas desde su generación hasta su disposición final. González (2019), destacan la importancia de adoptar un enfoque sistémico basado en la sostenibilidad urbana para la valorización de materiales reciclados, mientras que Albán (2022), subraya la relevancia de dimensionar adecuadamente

rellenos sanitarios y áreas de almacenamiento, con un enfoque en soluciones de impacto regional. Finalmente, investigaciones como la de Cayancela et al. (2022) evidencian el potencial de modelos cinéticos avanzados en la descomposición de residuos biomédicos, con aplicaciones en la generación de combustibles alternativos, reafirmando la viabilidad de estrategias que integren innovación y sostenibilidad en la gestión de residuos sólidos.

7.2.2.4 Disposición de los residuos en rellenos sanitarios

El relleno sanitario es la opción más respaldada a nivel mundial para la disposición final de residuos sólidos urbanos. Combina un confinamiento controlado con técnicas de ingeniería de suelos y sistemas para manejar lixiviados y biogás (Breda et al., 2024).

A diferencia del vertedero abierto, el relleno sanitario se construye sobre una celda impermeabilizada (arcilla compactada más geomembrana de HDPE), equipada con drenes de lixiviado, captación de gases y cobertura diaria; esta configuración minimiza la migración de contaminantes al agua subterránea y reduce la emisión directa de metano a la atmósfera (Marchiori et al., 2025).

En los últimos diez años, la tendencia ha sido avanzar hacia rellenos “biorreactor”, donde la recirculación controlada de lixiviados acelera la biodegradación anaerobia y, por lo tanto, la estabilización de los residuos .

Al mismo tiempo, los marcos regulatorios latinoamericanos se han ido adaptando a estándares internacionales de cierre técnico, monitoreo post clausura y aprovechamiento energético del biogás, y las normativas ecuatorianas, como la actualización de la NTE INEN 2841:2023 sobre gestión de residuos sólidos, exigen que los rellenos sanitarios implementen sistemas documentados de vigilancia hidrogeológica, captura y quema o aprovechamiento energético del metano, así como planes de estabilidad geotécnica post clausura. Estudios recientes reafirman que la captura y utilización del biogás puede atenuar el cambio climático y disminuir emisiones fugitivas, integrando el relleno sanitario en estrategias energéticas sostenibles (Yao et al., 2023).

El relleno sanitario es la mejor opción controlada para la disposición final de residuos sólidos urbanos, combinando principios de ingeniería, control ambiental y monitoreo post clausura, tal como se resume en la Tabla 11, que describe las principales etapas operativas desde

la preparación del sitio hasta el cierre técnico, en concordancia con las medidas ambientales y de sostenibilidad propuestas por Fuente et al. (2025).

Tabla 11. *Etapas de operación de un relleno sanitario*

Etapa	Descripción técnica
1. Preparación del sitio	Se realiza la limpieza, nivelación y adecuación del terreno. Incluye la construcción de drenes, impermeabilización del fondo con arcilla y geomembranas.
2. Recepción y pesaje de residuos	Los residuos ingresan controladamente y son registrados por su peso en la báscula.
3. Descarga y colocación	Los residuos se depositan en celdas activas y se compactan en capas de 30–50 cm con maquinaria especializada.
4. Compactación	Se busca reducir el volumen del residuo, aumentar la estabilidad del talud y minimizar la generación de lixiviados.
5. Cobertura diaria	Al final de cada jornada, los residuos se cubren con una capa de tierra u otro material para evitar vectores, olores y dispersión.
6. Control de lixiviados y biogás	Se recolectan los lixiviados mediante drenes y se gestionan en plantas de tratamiento; el biogás se capta, quema o aprovecha energéticamente.
7. Cierre y posclausura	Una vez saturada la celda, se sella con coberturas finales y se realiza monitoreo ambiental durante al menos 10–30 años.

Fuente. Adaptado de Fuente et al. (2025). Paving the way towards green contaminant analysis: Strategies and considerations for sustainable analytical chemistry.

7.3 Contexto actual en Ecuador

La generación de residuos sólidos urbanos (RSU) en Ecuador varía entre zonas urbanas y rurales y entre niveles socioeconómicos, pero a nivel nacional se produce aproximadamente de 0,72 a 0,85 kg/hab/día, siendo su composición dominada por materia orgánica (55 % aproximadamente), seguida de materiales reciclables (25 %) y residuos no aprovechables (20 %), lo cual es similar a lo que se informa para zonas andinas con patrones de consumo similares a los de la provincia de Tungurahua (Cobos, 2023).

Según el Instituto Nacional de Estadística y Censos, la gran cantidad de materia orgánica es una constante en los hogares ecuatorianos, mientras que los materiales plásticos son el principal residuo separado en la fuente, lo que demuestra su importancia en el flujo total de RSU y su potencial para ser aprovechados mediante el reciclaje (INEC, 2024).

A nivel cantonal, Pelileo y Patate tienen valores de generación per cápita menores al promedio nacional, que se relacionan con su baja densidad poblacional y sus patrones de consumo domésticos; el estudio técnico realizado para la mancomunidad Pelileo-Patate arrojó una generación promedio de 0,74 kg/hab/día en Pelileo y 0,70 kg/hab/día en Patate, con una

composición física de los residuos de entre 52 % y 54 % de materia orgánica, 22 % a 24 % de materiales reciclables y 24 % de no aprovechables (Ramos, 2025; Cobos et al., 2022).

En cuanto a los desechos plásticos, varios estudios han determinado que estos representan entre el 15 % y el 20 % de los RSU en cantones ecuatorianos con sistemas convencionales de gestión, ya que cada vez se consumen más productos de un solo uso, tal como ocurre en Pelileo y Patate, donde el incremento del consumo doméstico y comercial ha aumentado la proporción de plásticos en la fracción inorgánica, lo que refuerza la necesidad de desarrollar estrategias de reducción, sustitución y valorización (Merlo, 2022; INEC, 2024).

Desde la perspectiva institucional, la información proporcionada por los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales indica que solo el 27,1 % de los municipios a nivel nacional han iniciado o sostienen procesos de separación en la fuente y que aún la mayoría de los residuos sólidos urbanos se siguen eliminando sin ningún tipo de aprovechamiento. Además, casi el 60 % de los municipios deposita sus desechos en rellenos sanitarios, pero el resto lo hace en celdas emergentes o botaderos, evidenciando limitaciones técnicas y operativas en la gestión integral de residuos sólidos, sobre todo en municipios pequeños y medianos (INEC, 2025).

En resumen, los datos empíricos revelan que la generación per cápita de residuos en Pelileo y Patate se encuentra dentro del promedio nacional, pero con predominio de materia orgánica y baja tasa de aprovechamiento, lo cual refleja la necesidad de fortalecer la separación en la fuente, ampliar las capacidades de valorización y mejorar la gestión mancomunada como estrategias para avanzar hacia la economía circular y mejorar la sostenibilidad del sistema de gestión de residuos sólidos municipales.

7.4 Tecnologías emergentes de valorización

Las tecnologías de valorización son una nueva forma de manejo de residuos, donde se busca recuperar materiales y energía y así disminuir la carga a los rellenos sanitarios. En la tabla 12 se resumen los principales tipos de valorización (energética, orgánica y reciclaje) y autores que demuestran su eficacia y sostenibilidad en diferentes contextos.

Tabla 12. *Tipos de tratamiento y valorización de residuos sólidos*

Tipo de Valorización	Tratamientos	Conclusiones	Autor(es)
Energética	Gasificación por plasma	La gasificación por plasma es una solución rentable y sostenible para el tratamiento de residuos sólidos y la generación de energías renovables.	Briseño et al. (2020)
Orgánica y energética	Compostaje, biogás y biocombustibles	El compostaje y la obtención de biogás son métodos clave en la valorización de residuos orgánicos, favoreciendo la sostenibilidad y la generación de energía alternativa.	Cervantes et al. (2020)
Reciclaje	Recuperación de materiales reciclables	Indicadores propuestos permiten evaluar la sostenibilidad urbana y fomentar políticas para la gestión y valorización de residuos reciclables desde una perspectiva integral.	González, 2019.
Disposición final controlada	Diseño de relleno sanitario	Los vertederos a cielo abierto generan impactos negativos, resaltando la necesidad de implementar rellenos sanitarios controlados y sostenibles en zonas afectadas.	N. Rodríguez et al. (2021)
Energética	Desvolatilización	La desvolatilización permite reducir significativamente los residuos hospitalarios, obteniendo parámetros cinéticos para procesos más eficientes y sostenibles.	Cayancela et al. (2022)

Fuente. Elaborado por Camacho J. & Paredes K. (2025).

Paralelamente, la Tabla 13 viene a complementar la información anterior, especificando las tecnologías utilizadas en la valorización de residuos sólidos, las cuales se agrupan en tecnologías mecánicas, térmicas y biológicas, que permiten maximizar el uso de materiales y energía, creando sistemas más sostenibles y circulares, tal como recomienda el Ministerio de Desarrollo Social de Chile y la CEPAL.

Tabla 13. *Tecnologías para el tratamiento y valorización de residuos sólidos*

Categoría	Tecnología	Descripción y Aplicaciones
	Clasificación	Separa los residuos según su valor económico o como etapa previa para un procesamiento adicional.
Mecánicas	Trituración	Reduce el tamaño y el volumen de los residuos, facilitando su mezcla y homogeneización.
	Compactación	Disminuye los espacios vacíos entre residuos, incrementando su densidad.
Térmicas	Incineración	Quema controlada a alta temperatura en equipos especializados con sistemas de control ambiental.
	Pirólisis	Descomposición térmica en ausencia o con baja presencia de oxígeno, generando líquidos y gases de alto valor energético.
Biológicas	Procesos Aeróbicos	Estabilización y compostaje de residuos, produciendo agua, dióxido de carbono y calor.
	Procesos Anaeróbicos	Generan metano a través de una degradación lenta, produciendo ácidos grasos y gases como el ácido sulfhídrico (H ₂ S).

Fuente. Obtenido de la Guía general para la gestión de residuos sólidos domiciliarios. Ministerio de Desarrollo Social de Chile y la CEPAL.

7.5 Modelación de escenarios

El desarrollo sostenible en la gestión de residuos sólidos requiere la aplicación de modelos integrales que permitan la optimización de recursos y la reducción del impacto ambiental. La correcta implementación de un Sistema de Gestión Integral (SGI) es clave para su contribución al desarrollo sostenible, destacando su relación con normativas internacionales como las normas ISO. Un análisis de la producción científica en este ámbito revela un incremento significativo de publicaciones en la última década, con un auge particular en los años 2014 y 2015, lo que evidencia el creciente interés académico en la materia. Además, autores como Yectzin et al. (2022) han demostrado que los SGI pueden integrarse eficazmente en diferentes sectores económicos, proporcionando un marco estructurado para la gestión de residuos en el contexto de la Agenda 2030

Ceballos et al. (2020) destacan que, este enfoque simula el comportamiento individual de los actores dentro de un sistema, como recicladores, ciudadanos y empresas de recolección, y analiza cómo sus decisiones afectan al sistema global. Por ejemplo, desarrollaron un modelo basado en agentes para simular la conciencia ambiental y su impacto en la gestión de residuos sólidos en Colombia. Demostrando que el escenario con mayor tasa de aprendizaje (50%) resultó en un aumento del grupo con conciencia ambiental media y una disminución del grupo

con baja conciencia, estabilizando el nivel de conciencia en 9. En el escenario con un mayor radio de sociabilidad (10), la interacción entre agentes permitió un cambio en los hábitos de consumo en aproximadamente seis meses, incluso con solo un 2% de agentes inicialmente activos. Finalmente, el escenario empírico mostró un incremento en la separación adecuada de residuos, destacando la importancia de la interacción social y el aprendizaje en la mejora de la gestión de residuos.

7.6 Dinámica de sistemas

La dinámica de sistemas es una metodología que permite analizar y modelar el comportamiento de sistemas complejos a lo largo del tiempo, facilitando la comprensión de las interacciones entre sus componentes y la predicción de sus comportamientos futuros. En el ámbito de la gestión de residuos sólidos, esta herramienta se utiliza para evaluar y mejorar la eficiencia de los sistemas de recolección, tratamiento y disposición final de residuos (A. García et al., 2023).

La Dinámica de Sistemas, al aplicarse en la enseñanza ambiental, actúa como un vínculo que conecta diversos campos del conocimiento necesarios para comprender la situación ambiental actual del planeta, convirtiéndose en una herramienta clave para la transdisciplinariedad. Estos modelos, contribuyen a simular comportamientos relevantes en el ámbito de las ingenierías, otorgando mayor rigor y profundidad al componente ambiental (Wong et al., 2020).

Por otro lado, la Dinámica de Sistemas y su integración en la gestión de residuos sólidos municipales (RSM) han sido objeto de numerosos estudios recientes, abordando diversos enfoques y metodologías. Richard et al. (2021) destaca la aplicación de modelos basados en el ciclo de vida y la dinámica de sistemas para optimizar el tratamiento de residuos, incorporando procesos como recolección, incineración, compostaje y vertido, además de evaluar la sostenibilidad de estas prácticas en el marco de la gestión integral de residuos sólidos municipales (GIRSM).

7.6.1 Herramientas de la dinámica de sistemas

La dinámica de sistemas es una forma de representar y entender las interacciones complejas dentro del sistema de gestión de residuos y proveer una base cuantitativa para la toma de decisiones; en este estudio se usan herramientas de modelado y simulación para analizar el comportamiento de los flujos y su cambio en el tiempo. En la Tabla 14 se resumen las

principales herramientas y métodos utilizados, donde se encuentra que VENSIM y VENSIM PLE han sido utilizados en estudios anteriores, demostrando ser herramientas efectivas para modelar, simular y validar modelos de gestión sustentable.

Tabla 14. *Herramientas de la Dinámica de Sistemas*

Herramienta	Técnica	Método	Conclusiones	Autor(es)
VENSIM	Se empleó VENSIM para modelar, simular y analizar los flujos de sistema, utilizando funciones como SMOOTH para representar retardo de material y variaciones temporales.	<ul style="list-style-type: none"> El modelo, basado en datos históricos (1961-2030) y estimaciones de Pando, Bolivia. 	El modelo predice que estabilizar la producción de madera reduce residuos, optimiza el uso de aserrín en bioenergía y equilibra la deforestación, promoviendo el desarrollo sostenible del sector forestal.	Canedo (2022)
VENSIM PLE	<ul style="list-style-type: none"> Análisis dimensional. Calibración y validación del modelo. Construcción de diagramas causales y de niveles y flujos 	<ul style="list-style-type: none"> Dinámica de Sistemas. Revisión bibliográfica. Simulación de escenarios. 	El escenario más efectivo incluye un aumento del 33,41 % en el aprovechamiento total, acompañado de estrategias educativas para la población.	J. Rodríguez & Ibarra (2019)

Fuente. Elaborado por Camacho J. & Paredes K. (2025).

7.7 Etapas de un sistema de gestión integral de residuos sólidos

El manejo integral de residuos sólidos comprende el diagnóstico y la planificación. El diagnóstico determina las fuentes, tipos y cantidades de residuos existentes y los recursos disponibles, y la planificación define las etapas de almacenamiento, recolección, transporte, tratamiento y disposición final, para garantizar la eficiencia y sostenibilidad del sistema. Las etapas propuestas por A. Rodríguez & Baca (2022) del sistema de gestión de residuos se resumen en la Figura 3.

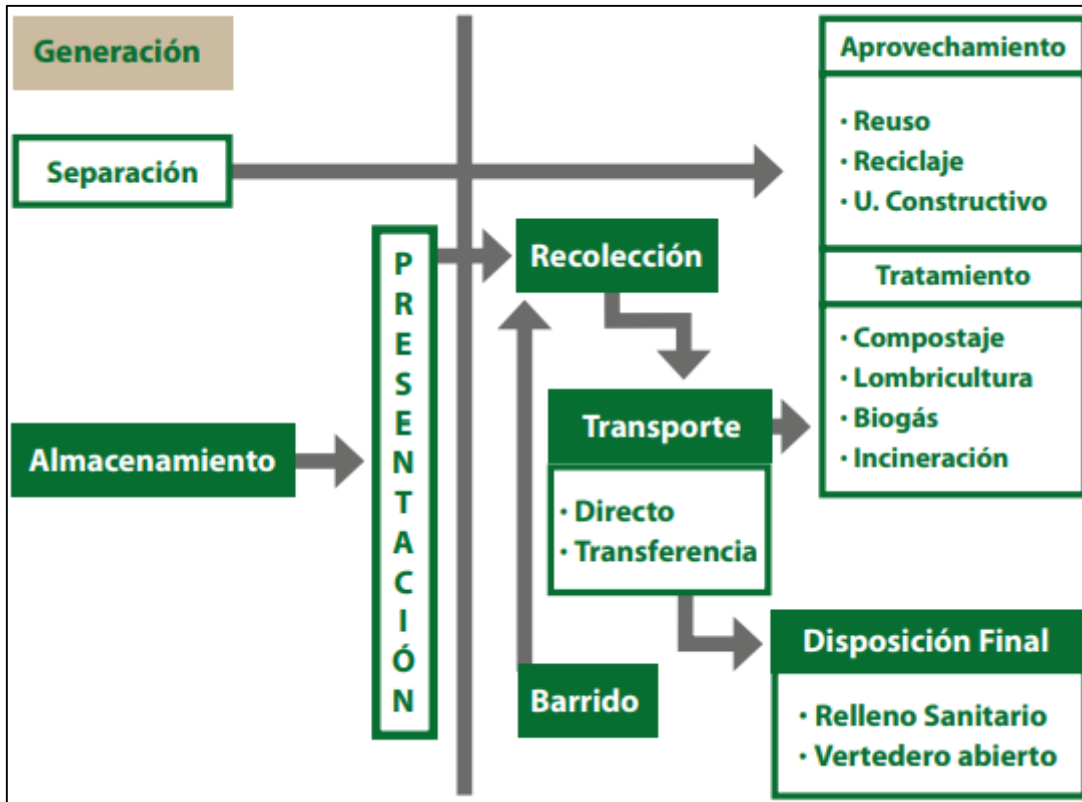


Figura 3. Etapas de un sistema de gestión de residuos

Por otro lado, en la Tabla 15 se describen las etapas globales basadas en la Guía para la Gestión Integral de Residuos Sólidos Municipales (2021).

Tabla 15. Etapas de un sistema integrado de gestión de residuos sólidos

Escenario	Descripción
Generación	Corresponde al momento en que los residuos sólidos se producen en las diferentes fuentes generadoras (doméstica, comercial, institucional, industrial, entre otras). El análisis de esta etapa es esencial para dimensionar adecuadamente las fases posteriores del sistema de gestión integrado.
Reducción y separación en la fuente	Incluye acciones destinadas a minimizar la cantidad de residuos generados y clasificar los residuos en el lugar donde se producen. Esta etapa facilita el uso, reduce los impactos medioambientales y optimiza la eficiencia del sistema.
Almacenamiento	Consiste en la retención temporal de residuos sólidos una vez generados y antes de su recogida o tratamiento. Puede ser dentro o fuera del hogar y su gestión adecuada influye directamente en la eficiencia de la recogida y la higiene pública.
Cosecha	Incluye la recogida manual o mecanizada de residuos almacenados y su transferencia inicial a estaciones de transferencia, plantas de tratamiento o

	sitios finales de eliminación. Representa una de las etapas con mayor coste operativo dentro del sistema.
Transporte y traslados	El transporte corresponde al traslado de residuos desde los puntos de recogida hasta los lugares de tratamiento o eliminación final. La transferencia ocurre cuando los residuos se transfieren a vehículos con mayor capacidad para optimizar costes y distancias de viaje.
Utilización (reutilización y reciclaje)	Incluye actividades destinadas a recuperar materiales con valor económico o medioambiental mediante la reutilización, el reciclaje u otras formas de recuperación, reducir el volumen de residuos destinados a la eliminación final y promover la economía circular.
Tratamiento	Consiste en la transformación física, biológica o química de los residuos con el objetivo de reducir su peligrosidad, volumen o impacto ambiental. Incluye procesos como el compostaje, la vermicultura, la producción de biogás y la incineración controlada.
Disposición final	Fase final del sistema, que consiste en el confinamiento seguro de residuos no utilizables en vertederos u otras instalaciones técnicamente diseñadas para minimizar riesgos medioambientales y sanitarios, en cumplimiento de la normativa vigente.

Fuente. Adaptado de PADIT (2021). Guía para la Gestión Integral de Residuos Sólidos Municipales.

7.8 Marco legal

La gestión integral de residuos sólidos en el Ecuador se alinea con instrumentos internacionales y nacionales que promueven la sostenibilidad ambiental y la economía circular, y que directamente respaldan el modelo mancomunado entre los cantones Pelileo y Patate, gestionado por EMMAIT-EP, al definir obligaciones, competencias y directrices técnicas para una gestión ambientalmente apropiada.

A nivel internacional, los compromisos ambientales del Ecuador son la base conceptual del sistema de gestión propuesto. La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (ONU, 2015) con el ODS 12 de producción y consumo responsables, en los que se basan la valorización, el reciclaje y la separación en origen modeladas en esta investigación; los Convenios de Estocolmo (2001) y Róterdam (1998) para controlar contaminantes orgánicos persistentes y comercio de productos químicos peligrosos, respectivamente, que previenen la disposición inadecuada en los rellenos sanitarios; y la Declaración de Río sobre Medio Ambiente y Desarrollo (1992) con los principios de precaución y corresponsabilidad ambiental, en los que se apoya la participación ciudadana y el enfoque preventivo del sistema mancomunado.

A nivel nacional, la legislación ecuatoriana define claramente las competencias y responsabilidades en la gestión de residuos sólidos; la Constitución de la República del Ecuador (2008) en su artículo 14 reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y

ecológicamente equilibrado, y el Código Orgánico del Ambiente (2017) refuerza los principios de prevención, aprovechamiento y corresponsabilidad en la gestión integral de residuos.

En particular, el artículo 27 del COA otorga a los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GADs) la competencia para planificar y ejecutar los sistemas de recolección, transporte, tratamiento y disposición final, lo que apoya la estructura del sistema mancomunado Pelileo-Patate, ya que es una gestión intermunicipal. Además, el artículo 225 fomenta la educación ambiental, la participación ciudadana y la utilización de los residuos como bienes con valor económico y social, principios que se ven directamente reflejados en los escenarios de valorización simulados en esta investigación con Dinámica de Sistemas en Vensim.

En ese sentido, el marco jurídico nacional e internacional no solo regula, sino que guía y legitima el modelo dinámico de gestión mancomunada propuesto, ya que los principios de sostenibilidad, participación y aprovechamiento son la base legal para implementar estrategias de separación en origen, compostaje y reciclaje, asegurando la consistencia del modelo con las políticas ambientales del país y los compromisos globales para el desarrollo sostenible.

8. PREGUNTA DE INVESTIGACION

La pregunta de investigación se formula con el objetivo de analizar, de manera comparativa, la eficacia operacional y ambiental del sistema mancomunado Pelileo-Patate para la gestión integral de residuos sólidos, en su estado actual y en diferentes situaciones de intervención que impliquen valorización de residuos y separación en el origen. En este contexto, el objetivo de la pregunta no es únicamente describir cómo funciona el sistema, sino también averiguar si las variaciones en variables estratégicas del modelo producen alteraciones significativas en su sostenibilidad y rendimiento.

Siguiendo esta formulación, las hipótesis se organizan como respuestas anticipadas y contrastables a la pregunta de investigación en el contexto de la Dinámica de Sistemas. La hipótesis nula (H_0) sugiere que las técnicas de separación en la fuente y valorización no modifican de manera significativa el rendimiento del sistema en comparación con la situación actual, lo que significa que la conducta del sistema se mantiene estructuralmente parecida incluso con la implementación de cambios operativos. En contraste, la hipótesis alternativa (H_1) sostiene que esas tácticas sí producen mejoras significativas en la eficiencia ambiental y operativa, las cuales se evidencian en una disminución de los desechos vertidos en el relleno sanitario, un aumento del aprovechamiento y una ampliación de la vida útil del sistema.

Hipótesis nula (H cero).

La implementación de estrategias de separación en la fuente y valorización de residuos no genera cambios significativos en la eficiencia operativa y ambiental del sistema mancomunado de gestión integral de residuos sólidos Pelileo–Patate, en comparación con el escenario actual.

Hipótesis alternativa (H₁).

La implementación de estrategias combinadas de separación en la fuente y valorización de residuos optimiza la eficiencia operativa y ambiental del sistema mancomunado de gestión integral de residuos sólidos Pelileo–Patate, en comparación con el escenario actual.

La hipótesis formulada se valida al corroborar que la puesta en marcha de estrategias de separación en la fuente, mejoradas por procesos de valorización, aumenta significativamente la eficacia operativa y medioambiental del sistema mancomunado de gestión integral de residuos sólidos Pelileo–Patate comparado con el escenario presente. La validación se basa en la disminución estructural de la dependencia del vertedero, el aumento sostenido de los indicadores fundamentales de sostenibilidad y el alargamiento efectivo de la vida útil del vertedero sanitario. Sin embargo, el análisis muestra que la separación en la fuente es el factor más importante para optimizarlo, a diferencia de la valorización, que funciona como un mecanismo adicional de estabilización del sistema. Esto hace posible especificar el alcance de la hipótesis desde los puntos de vista estructural y operativo.

Pregunta (P).

¿Qué tan eficiente es el sistema mancomunado de gestión integral de residuos sólidos Pelileo-Patate, y cómo cambia su eficiencia operativa y ambiental bajo cuatro escenarios de separación en la fuente y valorización de residuos modelados con dinámica de sistemas?

Los resultados del modelo dinámico muestran que el sistema mancomunado, en su condición actual (Escenario 1), tiene una eficiencia operativa y ambiental baja porque sigue enviando un alto volumen de residuos a la disposición final y no los aprovecha. El sistema acumula 164,629 toneladas en el relleno sanitario para el año 2035, con una vida útil calculada de 2.13 años y una ocupación cercana al 80%. Esto evidencia un comportamiento que no es sostenible a largo plazo.

Cuando se implementan estrategias de separación en la fuente y valorización, la eficiencia del sistema mejora considerablemente, como se puede ver al comparar los cuatro escenarios simulados. Esto sucede porque disminuye el volumen que se envía a disposición final, se eleva el material recuperado y queda más espacio remanente en el relleno. El Escenario 2 (30 % de separación en la fuente) muestra el mejor rendimiento global: disminuye los desechos acumulados a 130 776 t para 2035 (20,6 % menos que el escenario presente), reduce el flujo de residuos que llegan al relleno y extiende la vida útil a 4,86 años. También aumenta la cantidad reciclada y producida de compost (hasta 118,52 t/año de materiales recuperados y 1 164,4 t/año de compost por año para el año 2035). Aunque los resultados son más bajos en términos de vida útil (aproximadamente 3,25 y 3,31 años en 2035, respectivamente), el escenario 3 y el escenario 4 también mejoran el rendimiento en comparación con el escenario base. La simulación, en general, demuestra que la separación de origen es el factor más crucial para optimizar la eficiencia del sistema y disminuir la presión sobre el vertedero sanitario; en cambio, la valorización complementaria fortalece la estabilidad del sistema a largo plazo.

9. METODOLOGÍA

9.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación se desarrolló bajo un enfoque mixto con predominio cualitativo, sustentado en modelación mediante Dinámica de Sistemas y complementado con análisis interpretativo de sostenibilidad operativa. El componente cualitativo se basó en la caracterización física de residuos sólidos domiciliarios, los aspectos cuantitativos intervinieron en el cálculo de la producción per cápita y la simulación matemática de escenarios prospectivos mediante el software Vensim.

El modelo dinámico permitió representar formalmente las relaciones estructurales entre generación, separación en la fuente, reciclaje, aprovechamiento orgánico y disposición final, a través de ecuaciones de nivel y flujo. Estas ecuaciones expresan interdependencias funcionales entre variables, donde los cambios en las tasas de separación y reciclaje modifican directamente la acumulación de residuos en el relleno sanitario y, por tanto, su vida útil.

El análisis no se orientó a establecer causalidad estadística inferencial, sino a evaluar relaciones estructurales simuladas dentro de un sistema dinámico cerrado, donde las variables interactúan bajo restricciones físicas definidas (capacidad del relleno sanitario, tasas de aprovechamiento y generación poblacional).

El componente cualitativo consistió en la interpretación sistémica de los resultados simulados, el análisis comparativo de escenarios y la evaluación normativa respecto a la jerarquía de gestión establecida en el Código Orgánico del Ambiente, permitiendo contextualizar los hallazgos cuantitativos en términos operativos y ambientales.

Según Rodríguez & Ibarra (2019), los modelos de Dinámica de Sistemas en gestión ambiental no se enfocan en la cuantificación precisa de resultados, sino en representar las conexiones, bucles de retroalimentación y estructuras que determinan la evolución de los sistemas territoriales. En este caso, la simulación se usó como una herramienta de análisis sistémico para visualizar cómo las políticas de separación en origen, valorización o disposición final alteran el balance del sistema en el tiempo.

El enfoque cualitativo fue apropiado porque la gestión compartida de residuos sólidos involucra aspectos sociales, institucionales, técnicos y ambientales que no pueden ser capturados solo con números, sino que necesitan ser entendidos en términos de sus

interacciones y evoluciones. Por ello, la simulación en Vensim se empleó como herramienta representacional y analítica, cuyos resultados revelaron tendencias de comportamiento del sistema bajo distintas condiciones operativas.

En consecuencia, la metodología combinó el análisis documental, la observación de campo y la modelación sistémica para explicar cómo la separación en la fuente, la valorización y la capacidad del relleno sanitario afectan la sostenibilidad en el tiempo del sistema mancomunado Pelileo–Patate.

En este contexto, el enfoque cualitativo-sistémico posibilita que se contrasten las hipótesis propuestas en la investigación; esto se lleva a cabo al cotejar la conducta del sistema mancomunado bajo el escenario presente (relacionada con la hipótesis nula, H_0) y bajo situaciones de intervención fundamentadas en separación en la fuente y valorización de residuos (vinculadas con la hipótesis alternativa, H_1). Por lo tanto, la simulación dinámica es el método por el cual se determina si las estrategias de gestión alteran significativamente la eficacia del sistema en términos operativos y ambientales a lo largo del tiempo.

9.2 TIPOS DE INVESTIGACIÓN

La investigación adoptó un enfoque descriptivo, explicativo y aplicado, en línea con las tendencias actuales de los estudios de sostenibilidad urbana, que integran estudios empíricos de campo con modelos de simulación dinámica para evaluar políticas y estrategias de gestión ambiental (Marzouk & Fattouh, 2022).

9.2.1 Investigación descriptiva

La investigación descriptiva buscó caracterizar el estado actual del SIGRS, identificando sus principales elementos operativos, las condiciones de generación, recolección y disposición final, y la composición física de los residuos domiciliarios generados en el área de estudio.

9.2.2 Investigación explicativa

Desde la perspectiva explicativa, el estudio analizó las relaciones estructurales entre las principales variables del SIGRS mediante modelación dinámica, evaluando cómo modificaciones en la separación en origen, reciclaje y aprovechamiento orgánico alteran el comportamiento acumulativo del sistema en términos de disposición final, ocupación y vida

útil del relleno sanitario. La explicación no se fundamenta en inferencia estadística causal, sino en la simulación de interdependencias funcionales representadas en ecuaciones de nivel y flujo.

9.2.3 Variables del modelo

Las variables que se incluyeron en el modelo dinámico no fueron elegidas al azar, sino que son un resultado directo del diseño funcional del Sistema de Gestión Integral de Residuos Sólidos (SIGRS) y de las metas analíticas del estudio, cuyo propósito es analizar la sostenibilidad operativa del sistema mancomunado Pelileo-Patate en diferentes situaciones de gestión.

Según la perspectiva de Dinámica de Sistemas, el SIGRS se define como un sistema abierto que incluye stocks (acumulaciones), flujos (tasas de cambio) y variables auxiliares. La interacción entre estos elementos es la que determina cómo cambia el sistema con el tiempo (Rodríguez & Ibarra, 2019). Las variables elegidas, en este contexto, reflejan los procesos esenciales del ciclo de desechos sólidos, desde su creación hasta su valorización o eliminación definitiva.

Las variables de nivel (stocks) que se definieron para representar las acumulaciones físicas del sistema son: Residuos Reciclables (RR), Residuos Intermedios (RI), Residuos Orgánicos Valorizables (ORG) y Residuos Dispuestos en Relleno Sanitario (DF). Esto es porque posibilitan la observación del impacto acumulativo que tienen las decisiones de gestión sobre el volumen de los desechos a lo largo del tiempo. Particularmente, el stock de RI es el nodo principal del modelo porque agrupa los residuos recolectados que luego se redistribuyen para reciclaje, uso orgánico o eliminación final.

Las variables de flujo (*rates*), tales como Generación de Residuos (RG), Reciclaje (Rec) y Aprovechamiento Orgánico (AO), simbolizan las transferencias dinámicas entre los diferentes stocks, mostrando la rapidez con que los residuos entran en el sistema, se valoran o son eliminados. Estas tasas posibilitan la simulación de cómo las modificaciones en la generación, separación o reciclaje alteran la presión ejercida sobre el relleno sanitario.

Las variables auxiliares, como la capacidad del relleno sanitario (CR), la tasa de reciclaje (TR) y la tasa de separación en la fuente (SF), realizan una función de control estructural del modelo porque limitan el tamaño de los flujos y fijan restricciones físicas al

sistema. La capacidad del relleno sanitario, especialmente, tiene un papel fundamental como condición límite para analizar la viabilidad a largo plazo del sistema.

En conjunto, las variables que se muestran en la Tabla 16 forman la base lógica, matemática y conceptual del modelo dinámico. Esto hace posible que los procesos reales del SIGRS mancomunado sean representados de forma integrada y se simule cómo responden a diversas estrategias de gestión.

Tabla 16. Variables para el modelo

Código	Variable	Componente	Unidad	Variable	Observación
RG	Generación de residuos	Flujo de “Generación” hacia <i>Residuos Intermedios</i>	Toneladas/año	Flujo (Rate)	Proviene de Población × generación per cápita
SF	Tasa de separación en la fuente	Auxiliar	%	Auxiliar	Controla proporción de materiales segregados
TR	Tasa de reciclaje	Auxiliar	%	Auxiliar	Determina el flujo hacia reciclaje
Rec	Flujo de reciclaje	“Reciclables a reciclaje”	Toneladas/año	Flujo (Rate)	NO es un stock; depende de TR × RI
RR	Residuos reciclables	Stock	Toneladas	Nivel (Stock)	Stock visible en el diagrama
DF	Residuos dispuestos en relleno sanitario	Stock “RESIDUOS EN RELLENO”	Toneladas	Nivel (Stock)	Coincide con el diagrama
CR	Capacidad del relleno sanitario	Auxiliar	Toneladas	Auxiliar	Límite del stock “Residuos en Relleno”
I ₁	Indicador de residuos aprovechados	Auxiliar	%	Auxiliar (Indicador)	Fórmula: $I_1 = \text{aprovechados} / \text{generados} \times 100$
I ₂	Indicador de disposición adecuada	Auxiliar	%	Auxiliar (Indicador)	Fórmula: $I_2 = \text{disposición} / \text{generados} \times 100$
RI	Residuos intermedios	Stock	Toneladas	Nivel (Stock)	Nodo central del modelo
RC	Residuos recolectados	Flujo	Toneladas/año	Flujo (Rate)	En el diagrama NO aparece como stock

ORG	Residuos orgánicos valorizables	Stock “RESIDUOS ORGÁNICOS”	Toneladas	Nivel (Stock)	Sí existe como stock
AO	Aprovechamiento orgánico	Flujo “Orgánicos a compostaje”	Toneladas/año	Flujo (Rate)	Depende de % orgánicos × RI

Fuente. Elaborado por Camacho J. & Paredes K. (2025).

Los valores iniciales y tasas empleadas en las ecuaciones fueron parametrizados a partir de los resultados del muestreo domiciliario, la producción per cápita calculada y los registros operativos proporcionados por EMMAIT-EP, garantizando coherencia entre datos empíricos y simulación. Adicionalmente, las simulaciones no modificaron la generación total de residuos, ya que esta depende exclusivamente del crecimiento poblacional y del PPC calculado empíricamente; los cambios entre escenarios se introdujeron únicamente en las tasas de separación y valorización.

9.2.4 Indicadores de desempeño del sistema

Los indicadores establecidos en el modelo no se incluyeron solamente con propósitos descriptivos, sino como instrumentos analíticos para evaluar el rendimiento del sistema, que posibilitan la interpretación de los resultados de la simulación y la comparación objetiva de los escenarios de gestión sugeridos.

Los indicadores son fundamentales en las investigaciones que se basan en la dinámica de sistemas porque convierten el comportamiento interno del modelo en métricas sintéticas que son comprensibles para tomar decisiones y están alineadas con las metas de sostenibilidad del sistema (Rodríguez & Ibarra, 2019). En esta situación, los indicadores elegidos están directamente relacionados con las variables estructurales del modelo y con los aspectos críticos del SIGRS, en particular la valorización de residuos y la presión sobre el tratamiento final.

El Indicador de Residuos Aprovechados (I_1) fue creado para medir cuán eficiente es el sistema al recuperar y valorizar residuos, unificando en una única métrica las consecuencias conjuntas del reciclaje, la valorización orgánica y la separación en el origen. Este indicador posibilita medir en qué grado el sistema se acerca a los principios de economía circular, ya que muestra la relación entre los residuos desviados del vertedero sanitario y la cantidad total generada.

El Indicador de Disposición Adecuada (I_2), por otro lado, se empleó para calcular la dependencia del sistema en relación con el relleno sanitario final, mostrando la carga que esta

infraestructura soporta y su efecto sobre el tiempo de vida útil del sistema. Este indicador es especialmente importante en situaciones donde la capacidad del relleno supone una limitación significativa, como sucede en el sistema mancomunado Pelileo-Patate.

Los dos indicadores se determinan a partir de las variables internas del modelo dinámico, lo cual garantiza su consistencia metodológica y previene la utilización de métricas externas que no están conectadas con el funcionamiento auténtico del sistema. Asimismo, su formulación porcentual permite la comparación entre escenarios sin importar el volumen absoluto de desechos, lo cual posibilita determinar el rendimiento relativo de cada táctica de gestión.

Por lo tanto, los índices I_1 e I_2 no solo resumen los resultados de la simulación, sino que también son herramientas esenciales para detectar escenarios más sostenibles, demostrar compensaciones entre valoración y disposición final, y respaldar las conclusiones del estudio desde un punto de vista técnico.

Indicador de residuos aprovechados

$$I_1 = \frac{\textit{Residuos aprovechados}}{\textit{Residuos generados}} * 100$$

Indicador de residuos dispuestos adecuadamente

$$I_2 = \frac{\textit{Residuos dispuestos en rellenos sanitarios}}{\textit{Residuos generados}} * 100$$

La elección de los indicadores I_1 (residuos aprovechados) e I_2 (disposición adecuada) se basa en la priorización de la gestión integral de residuos, que está definida por el Código Orgánico del Ambiente (COA) ecuatoriano. Esta jerarquía establece que lo más importante es prevenir, seguido de separar en la fuente y aprovechar, y finalmente disponer controladamente. En este contexto, los indicadores establecidos posibilitan la evaluación cuantitativa del nivel de alineación que tiene el sistema mancomunado con respecto a la normativa nacional. Se mide tanto la capacidad de valorización como la dependencia de la disposición final.

9.3 ÁREA DE ESTUDIO

La zona de investigación incluye los cantones Patate y San Pedro de Pelileo, localizados en la provincia ecuatoriana de Tungurahua. Estos son parte de la Mancomunidad EMMAIT-

EP, una compañía pública encargada del manejo total de residuos sólidos en el centro del país. Este territorio experimenta un rápido proceso de urbanización y crecimiento poblacional, vinculado a las actividades agroindustriales, comerciales y domésticas que han elevado de forma constante la producción de residuos sólidos. Esto ha puesto presión sobre la infraestructura existente y ha puesto en riesgo la sostenibilidad medioambiental del sistema de gestión.

El hecho de que este caso de estudio sea un modelo de gestión mancomunada que está en proceso de transición hacia enfoques de economía circular es la razón para su selección. Esto posibilita, usando Dinámica de Sistemas, la simulación del impacto que tienen las decisiones sobre separación en origen, valorización y eliminación final en el comportamiento general del sistema territorial de gestión de residuos sólidos.

En el cantón Patate y en el cantón San Pedro de Pelileo, se recogieron 1.099,6 kg y 1.686,85 kg de desechos sólidos, respectivamente, durante una semana de muestreo domiciliario. Se utilizó el método de cuarteo sucesivo para minimizar el volumen y obtener una muestra representativa y uniforme de los residuos obtenidos, logrando pesos específicos de 497,4 kg para Patate y 454,48 kg para Pelileo. En los dos cantones se observó que las fracciones orgánicas, reciclables y de rechazo eran las más numerosas, con una alta presencia de humedad y materiales mezclados. Esto indica poca separación en origen y condiciones operativas parecidas en la disposición final dentro del sistema mancomunado.

Figura 4. Ubicación geográfica de los cantones Patate y San Pedro de Pelileo, en la provincia ecuatoriana de Tungurahua, que son parte de la Mancomunidad EMMAIT-EP.

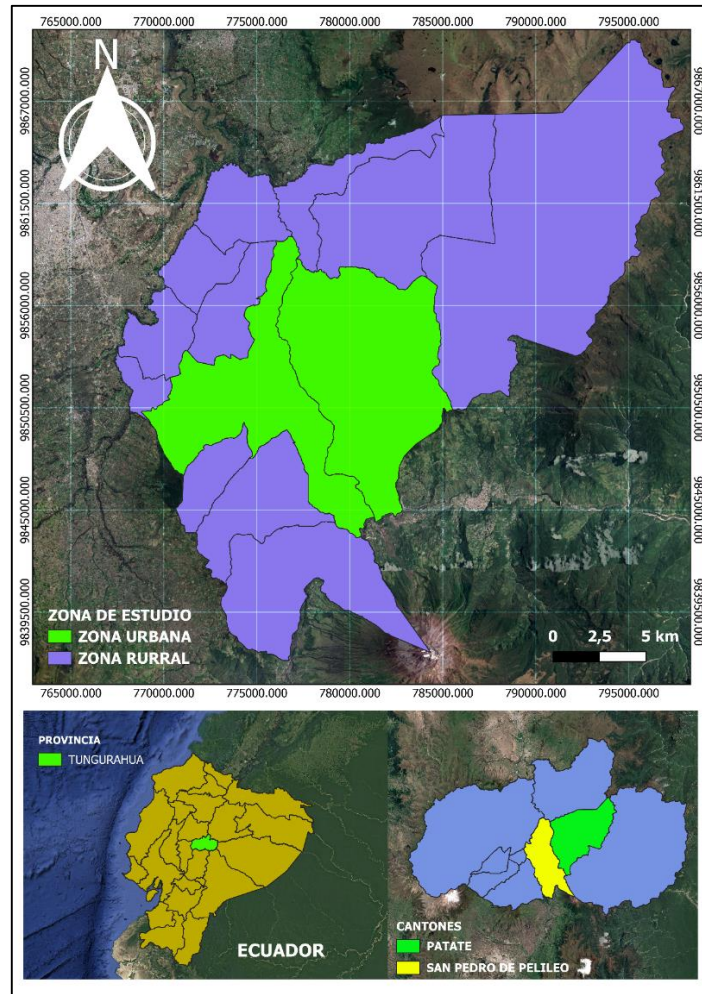


Figura 4. Área de estudio

Fuente. Elaborado por Camacho J. & Paredes K. (2025).

9.4 MÉTODOS

La metodología se fundamentó en la integración de métodos inductivo, deductivo y analítico-sintético, aplicados de manera articulada en la construcción, parametrización y evaluación del modelo dinámico del sistema mancomunado Pelileo–Patate. Esta integración permitió asegurar coherencia estructural entre los datos empíricos obtenidos en campo y los resultados derivados de la simulación prospectiva.

El método inductivo se aplicó en la fase de construcción y parametrización del modelo, partiendo de datos reales obtenidos mediante el muestreo domiciliario, la caracterización física de residuos, el cálculo de la producción per cápita y los registros operativos históricos proporcionados por EMMAIT-EP. A partir de esta evidencia empírica se identificaron patrones de generación, separación y disposición, los cuales fueron traducidos en variables, tasas y ecuaciones del modelo dinámico.

El método deductivo se utilizó para evaluar las hipótesis planteadas, contrastando el comportamiento del sistema bajo el escenario actual (H_0) y bajo escenarios de intervención (H_1). Mediante simulación en Vensim, se analizaron los efectos estructurales que producen variaciones en las tasas de separación y valorización sobre indicadores como residuos aprovechados (I_1), disposición final (I_2), ocupación y vida útil del relleno sanitario.

El método analítico permitió desagregar el sistema en componentes estructurales (stocks, flujos y variables auxiliares), identificando interdependencias funcionales entre generación, reciclaje, aprovechamiento orgánico y disposición final. Por su parte, el método sintético integró estos componentes en un modelo sistémico único, formalizado mediante ecuaciones de nivel y flujo, que permitió simular el comportamiento acumulativo del sistema bajo distintos escenarios de gestión.

La validación consistió en contrastar las tendencias de la simulación con datos históricos del sistema mancomunado, verificando coherencia lógica entre los flujos modelados y el comportamiento real observado.

9.4.1 Procedimiento técnico y control de calidad

El método técnico se llevó a cabo según técnicas estandarizadas de muestreo por cuarteo, siguiendo la NTE INEN 695:2010 y normas ASTM; primero se homogeneizó el material recogido y se extendió en forma de cruz para dividirlo en cuatro partes iguales, de las cuales se eliminaron dos opuestas, se mezclaron las dos restantes y se repitió el proceso hasta obtener la muestra final. Este procedimiento se repitió hasta obtener una muestra representativa de la composición física y porcentual de los residuos sólidos domiciliarios (Anexo 1).

9.4.2 Producción Per Cápita por día (PPC)

Para determinar la Producción Per Cápita diaria (PPC), se tomaron en cuenta solamente las viviendas que participaron de manera continua durante los 7 días de muestreo, para garantizar la homogeneidad de los datos; la PPC se determinó mediante la siguiente fórmula:

$$PPC = \frac{\text{Peso total de las muestras lb/kg}}{\text{Número total de personas de la muestra} * N^{\circ} \text{ de días de recolección}}$$

9.4.3 Prueba de composición física

Para determinar la composición física de los residuos sólidos domiciliarios se volvió a utilizar el método de cuarteo manual, el cual consistió en vaciar y mezclar el contenido de las bolsas recolectadas por estrato sobre una superficie limpia, dividirlo en cuatro partes iguales y eliminar dos partes opuestas de forma aleatoria; este proceso se repitió hasta obtener una muestra representativa.

En la Figura 4 se puede observar el proceso de cuarteo y clasificación de la muestra. Una vez obtenidos los pesos de cada tipo de residuo, se calculó su porcentaje diario con respecto al peso total de la muestra, utilizando la siguiente fórmula:

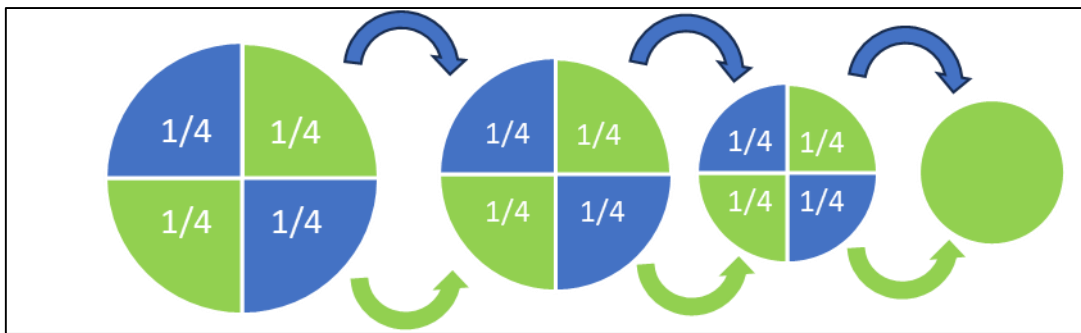


Figura 5. Método de cuarteo

Nota. Se repite el procedimiento de cuarteo hasta obtener una muestra representativa de aproximadamente 100 libras. Esta muestra se utiliza para realizar la composición de los residuos sólidos. Una vez obtenida, los residuos se clasifican según su tipo.

Los valores diarios fueron promediados al final del periodo de muestreo, obteniéndose así una composición física representativa en porcentajes por categoría (Anexo 2).

$$\text{Porcentaje \% por día} = \frac{\text{Peso de cada residuo clasificado}}{\text{Peso total de la muestra}} * 100$$

9.5 Simulación del modelo

La simulación del sistema se llevó a cabo con el software Vensim PLE, herramienta validada en la literatura para modelar sistemas complejos de gestión ambiental (Biglari et al., 2022). Una vez construido el modelo dinámico, se simularon los escenarios para determinar el comportamiento del sistema mancomunado Pelileo-Patate bajo diferentes escenarios de gestión, cuyas condiciones iniciales se basaron en datos históricos de población, tasas de generación, reciclaje, aprovechamiento y capacidad del relleno sanitario, con las cuales se modelaron cuatro escenarios de intervención propuestos por Rodríguez & Ibarra (2019), que

permitieron analizar el impacto de cada escenario en la eficiencia del sistema y la vida útil del relleno sanitario, como se muestra en la Tabla 17.

El modelo se desarrolló creando diagramas causales y de niveles y flujos que definieran matemáticamente las relaciones entre las variables del sistema. Con esta base se configuraron cuatro escenarios de intervención propuestos por J. Rodríguez & Ibarra (2019):

- Escenario 1: Estado actual del sistema.
- Escenario 2: Aprovechamiento del 30 % en la separación de origen.
- Escenario 3: Aprovechamiento del 20 % del total de residuos.
- Escenario 4: Combinación de separación en origen y aprovechamiento.

El motor de simulación de Vensim permitió visualizar la evolución en el tiempo de variables críticas como residuos generados, valorizados y dispuestos en el relleno sanitario, las cuales ilustran cómo cada estrategia impacta la vida útil del relleno sanitario, la eficiencia del sistema y los indicadores de sostenibilidad. Los escenarios representan diferentes formas de gestión en el modelo mancomunado, donde se puede comparar el desempeño del sistema en condiciones variables de separación, reciclaje y aprovechamiento, como se muestra en la Tabla 17.

Tabla 17. Simulación del Modelo

Escenario	Descripción	Datos Necesarios	Resultados
Escenario 1: Estado actual del sistema	Representa el sistema en su estado actual, sin cambios en estrategias.	<ul style="list-style-type: none"> - Tasas actuales de generación, reciclaje, aprovechamiento y disposición final. - Capacidad operativa del relleno sanitario. - Indicadores de cobertura y eficiencia en la recolección. 	<ul style="list-style-type: none"> - Diagnóstico del desempeño actual. - Impacto en la sostenibilidad a corto, mediano y largo plazo.
Escenario 2: Incremento en la separación en la fuente	Simula un aumento en la separación en origen mediante campañas de sensibilización.	<ul style="list-style-type: none"> - Proyección de participación ciudadana en la separación (hogares y establecimientos). - Incremento en el volumen de residuos reciclables y orgánicos separados. - Impacto estimado en costos operativos (rutas específicas para residuos separados). 	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento en el porcentaje de residuos reciclados y valorizados. - Reducción de residuos enviados al relleno sanitario. - Mejora en la vida útil del relleno sanitario.
Escenario 3: Incremento del reciclaje al 20%	Evalúa estrategias para incrementar la tasa de reciclaje al 20%, incluyendo formalización de recicladores.	<ul style="list-style-type: none"> - Tasa actual de reciclaje y valorización. - Capacidad de los recicladores formales y centros de acopio. - Costos de implementación para estrategias de formalización e infraestructura. 	<ul style="list-style-type: none"> - Incremento significativo en la cantidad de residuos reciclados. - Mejora en indicadores de residuos aprovechados (I₁) y disposición adecuada (I₂). - Impacto económico positivo para recicladores.
Escenario 4: Valorización avanzada con aprovechamiento máximo del 50%	Proyecta un modelo ambicioso logrando un 50% de valorización de residuos.	<ul style="list-style-type: none"> - Capacidades proyectadas de separación en la fuente y reciclaje. - Capacidad técnica para aprovechamiento orgánico (compostaje, biodigestión, etc.). - Inversión en tecnologías avanzadas y estrategias de sensibilización ciudadana. 	<ul style="list-style-type: none"> - Reducción drástica en residuos enviados al relleno sanitario. - Prolongación considerable de la vida útil del relleno sanitario. - Transformación hacia economía circular.

Fuente. Elaborado por Camacho J. & Paredes K. (2025).

9.5.1 Capacidad del relleno sanitario

La empresa que gestiona el relleno sanitario mancomunado Pelileo-Patate proporcionó información operativa para calcular la capacidad total. El relleno tiene un total de 18 cubetos: 16 están ocupados, uno está en funcionamiento y uno más está por ser utilizado.

Los cubetos ocupados tienen una capacidad de almacenamiento media de cerca de 11.500 toneladas métricas por cubeto, lo que resulta en un total acumulado de 184.000 toneladas métricas. El cubeto actualmente en uso tiene una capacidad de 11.430 TM, mientras que la capacidad proyectada del cubeto restante es de 10.200 TM; a este valor se le suma dicha cantidad. Por lo tanto, se estima que la capacidad total del relleno sanitario es de 205.630 toneladas métricas; este dato fue empleado como parámetro base para simular el modelo dinámico.

9.5.2 Cálculo de tasas específicas para el modelado

Las tasas específicas simuladas se derivaron de los resultados del método de cuarteo y de los datos operativos del sistema mancomunado, las cuales lograron parametrizar las relaciones entre generación, recolección, reciclaje y disposición final, y se resumen en la Tabla 18, siendo los parámetros de entrada del modelo dinámico.

Tabla 18. Cálculo de indicadores método de cuarteo

Indicador	Fórmula
Tasa de separación en la fuente (%)	$TS = \frac{\text{Peso de residuos separados en origen}}{\text{Peso total de residuos recolectados}} * 100$
Tasa de reciclaje (%)	$TR = \frac{\text{Peso de residuos reciclados}}{\text{Peso total de residuos recolectados}} * 100$
Tasa de aprovechamiento orgánico (%)	$TO = \frac{\text{Peso de residuos aptos para compostaje}}{\text{Peso total de residuos recolectados}} * 100$
Tasa de recolección (%)	$TR = \frac{\text{Peso total de residuos recolectados}}{\text{Peso total estimado generado}} * 100$
Tasa de disposición final (%)	$TD = \frac{\text{Peso de residuos para relleno sanitario}}{\text{Peso total recolectado}} * 100$

Fuente. Elaborado por Camacho J. & Paredes K. (2025).

Análisis y visualización de resultados

Una vez ejecutadas las simulaciones, se generaron gráficos y tablas comparativas que permiten interpretar cómo se comporta el sistema bajo cada escenario. Entre los análisis realizados destacan:

Capacidad del relleno sanitario: evaluaciones que muestran la proyección de vida útil según la estrategia aplicada.

Residuos aprovechados vs. dispuestos: gráficos que comparan el desempeño de cada escenario respecto a reciclaje, valorización orgánica y disposición final.

Validación del modelo: los resultados fueron contrastados con datos históricos disponibles para verificar la representatividad del modelo y su capacidad de reproducir comportamientos reales.

9.5.3 Proceso del modelado

Conceptualización del sistema

Se identifican las variables clave del sistema de gestión de residuos y se definen sus interrelaciones:

Variables de nivel: Residuos generados, residuos aprovechados, residuos dispuestos en rellenos sanitarios, etc.

Tasas: Tasas de generación, reciclaje, aprovechamiento y disposición.

Factores auxiliares: Separación en la fuente, capacidad del relleno sanitario.

Construcción del diagrama causal

Un diagrama causal es una representación gráfica que ilustra las relaciones de causa y efecto entre variables dentro de un sistema. Estas representaciones permiten visualizar cómo los cambios en una variable pueden influir en otras, facilitando la comprensión de dinámicas complejas. Según Uleman et al. (2024), los diagramas causales, también conocidos como Diagramas de Causalidad Dirigida (DAGs, por sus siglas en inglés), son herramientas fundamentales en la inferencia causal, ya que ayudan a identificar y representar las relaciones causales entre variables de interés.

9.5.4 Diseño del modelo

El sistema se formaliza mediante un diagrama de niveles y flujos, traduciendo las relaciones conceptuales en ecuaciones matemáticas. Estas ecuaciones incluyen:

Ecuaciones de nivel: Representan el estado acumulado de una variable en un momento dado, como la cantidad de residuos generados o dispuestos.

$$RI = (G) - ((Rec) + (A))$$

Donde:

- RI: Residuos Intermedios
- G: Residuos Generados
- Rec: Reciclaje
- A: Aprovechamiento

Ecuaciones de flujo: Modelan los cambios en las variables a lo largo del tiempo, como la tasa de reciclaje o de disposición final.

$$Rec = (Tr) \times (RI)$$

Donde:

- Rec: Reciclaje
- Tr: Tasa de Reciclaje
- RI: Residuos Intermedios

Para el presente estudio se utilizó el software Vensim, el cual permitió simular en el software Vensim los comportamientos del sistema bajo diferentes condiciones iniciales.

9.5.5 Análisis y visualización de resultados

Los resultados obtenidos de las simulaciones fueron analizados mediante gráficos y tablas que muestren el comportamiento de las variables en función del tiempo. Algunos ejemplos de análisis realizados incluyen:

Capacidad del relleno sanitario: Gráficos que muestren cómo diferentes estrategias impactan la disponibilidad del relleno sanitario hasta el año propuesto.

Residuos aprovechados y dispuestos: Gráficas comparativas de los indicadores de aprovechamiento y disposición adecuada en cada escenario.

9.6 TÉCNICAS

La metodología utilizó métodos cualitativos y analíticos para comprender la dinámica operativa y social del sistema mancomunado Pelileo-Patate, con técnicas de observación directa en puntos críticos de recolección y disposición final, revisión documental de leyes e informes técnicos, construcción de diagramas causales y análisis de datos con enfoque cualitativo-sistémico. La triangulación de estas técnicas integró información empírica, documental y de simulación dinámica, garantizando la validez interna del estudio y la coherencia interpretativa de los resultados simulados en Vensim.

9.7 Revisión documental

Se revisaron normativas, informes técnicos y bases de datos institucionales de la Empresa Municipal Mancomunada de Aseo Integral de los cantones Patate y Pelileo (EMMAIT-EP) que proporcionaron información histórica y actual sobre la generación, recolección, aprovechamiento y disposición final de residuos sólidos, lo que permitió caracterizar el sistema y definir los parámetros para el modelo de simulación.

9.8 Diagramas causales

Se utilizaron diagramas causales para identificar y visualizar las relaciones de causa-efecto entre las principales variables del sistema de gestión de residuos sólidos, identificando bucles de retroalimentación reforzadores y equilibradores. Estos diagramas ayudaron a entender cómo estaba estructurado el sistema y sirvieron como marco conceptual para desarrollar luego el diagrama de niveles y flujos del modelo dinámico en Vensim.

10. POBLACIÓN Y MUESTRA

10.1 Población

La población de estudio del cantón Patate y Pelileo refleja una distribución equilibrada entre hombres y mujeres, con una ligera predominancia femenina. Este balance demográfico proporciona una base representativa para el análisis de las características y dinámicas poblacionales en el contexto local (Tabla 19).

Tabla 19. Población del cantón Patate y Pelileo

Cantón	Número total de personas	Hombres	Mujeres
Zona Urbana	11 403	5 437	5 966
Zona Rural	52 494	25 232	27 262
Total Pelileo	63 897	30 669	33 228
Zona Urbana	2 514	1 245	1 269
Zona Rural	11 365	5 538	5 827
Total Patate	13 879	6 783	7 096

Fuente. Obtenido del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (2022). Estadísticas de Información Ambiental Económica en Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales. Instituto Nacional de Estadísticas y Censos.

10.2 Muestra

Para la obtención de datos físicos necesarios en la modelación dinámica del sistema de gestión de residuos del cantón Pelileo, se definió una muestra de viviendas sobre las cuales se recolectarán residuos sólidos domiciliarios durante un período determinado, para luego aplicar el método de cuarteo y realizar el análisis de composición (Tabla 20). La determinación del tamaño de muestra se realizó utilizando la fórmula estadística para poblaciones finitas:

$$n = \frac{n_0}{1 + \frac{n_0}{N}} \quad n_0 = p * (1 - p) * \left[\frac{Z(1 - \frac{\alpha}{2})}{d} \right]^2$$

Tabla 20. Nomenclatura para el cálculo de la muestra

Parámetro	Descripción	Valor
N	Tamaño de la muestra (número de viviendas).	-
N	Población finita (número de viviendas estimadas).	-
Z	Valor Z para un nivel de confianza de 90%	1,64
S	Desviación estándar estimada.	0,5
E	Margen de error permitido.	9%

Nota. Se adoptó un margen de error del 9% debido a limitaciones operativas y de tiempo que impiden realizar la recolección y caracterización de residuos en un número mayor de viviendas. Además, la aplicación del método de cuarteo garantiza una muestra representativa y homogénea, incluso con un tamaño reducido, al minimizar la variabilidad del material recolectado.

Los resultados derivados de la muestra (PPC, composición porcentual y tasas específicas) fueron utilizados como parámetros de entrada del modelo dinámico para la simulación de escenarios prospectivos.

11. INSTRUMENTOS Y MATERIALES

Software Vensim: Para construir, simular y analizar el modelo dinámico.

Indicadores clave: Provenientes de fuentes oficiales y calculados en base a datos locales.

Revisión de normativas locales: Incluyendo planes de gestión de residuos y políticas ambientales.

12. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Resultados del objetivo 1

Para asegurar la representatividad y minimizar errores sistemáticos, se aplicó el método de cuarteo manual, siguiendo a Yectzin et al. (2022), que implica mezclar, formar conos y dividir sucesivamente las muestras hasta obtener fracciones homogéneas y manipulables para su caracterización física por tipo de residuo.

12.1 Resultados método de cuarteo Cantón Patate

En la Tabla 21 se muestran los resultados obtenidos luego de aplicar el método de cuarteo en el cantón Patate, con el fin de demostrar la información general del muestreo, el número de viviendas muestreadas y las masas totales de residuos recolectadas y caracterizadas, demostrando la eficiencia del método de reducción y la representatividad de las submuestras utilizadas para el análisis físico.

Tabla 21. *Ficha técnica de cuarteo del cantón Patate*

Datos	Descripción
Localidad	Cantón Patate
Provincia	Tungurahua
Periodo de análisis	Campaña de 7 días de muestreo domiciliario
Número de viviendas muestreadas	74 viviendas
Número total de habitantes	310 personas
Peso total de residuos recolectados en la semana	1 099,6 kg (suma diaria de la semana)
Peso total de residuos caracterizados por fracción	497,4 kg (suma de las muestras cuarteadas de los 7 días)
Método de reducción	Cuarteo sucesivo hasta obtener submuestras manejables por fracción
Estado del residuo	Mezcla de orgánicos, reciclables y rechazo; alta humedad
Observaciones de campo	Alta presencia de fracción orgánica, humedad marcada y descomposición rápida; mezcla frecuente de residuos reciclables con orgánicos
Responsable del análisis	Equipo técnico de investigación
Institución	Universidad Técnica de Cotopaxi

Nota. Los 1 099,6 kg corresponden a la suma de los residuos recolectados en los 7 días. Los 497,4 kg son la suma de las masas por tipo de residuo en las tablas de caracterización (orgánicos, plásticos, cartón, vidrio, metales, textiles y rechazo).

Cálculo de la producción per cápita diaria (PPC) – Patate

- Número total de personas: 310
- Residuos totales en la semana: 1 099,6 kg
- Número de días: 7.

$$PPC = \frac{1099,6 \text{ kg}}{310 \text{ personas} * 7 \text{ días}} = 0,51 \text{ kg/per/día}$$

En el cantón Patate se trabajó con 74 viviendas y 310 habitantes, generando 1 099,6 kg/semana de residuos. Después del cuarteo se obtuvo una muestra final de 497,4 kg, lo que equivale a 157,1 kg/día y 2,12 kg/vivienda/día y 0,51 kg/habitante/día.

Así mismo, en la Figura 6 se puede observar la variación diaria de la generación per cápita de residuos en el cantón Patate durante la semana de muestreo.

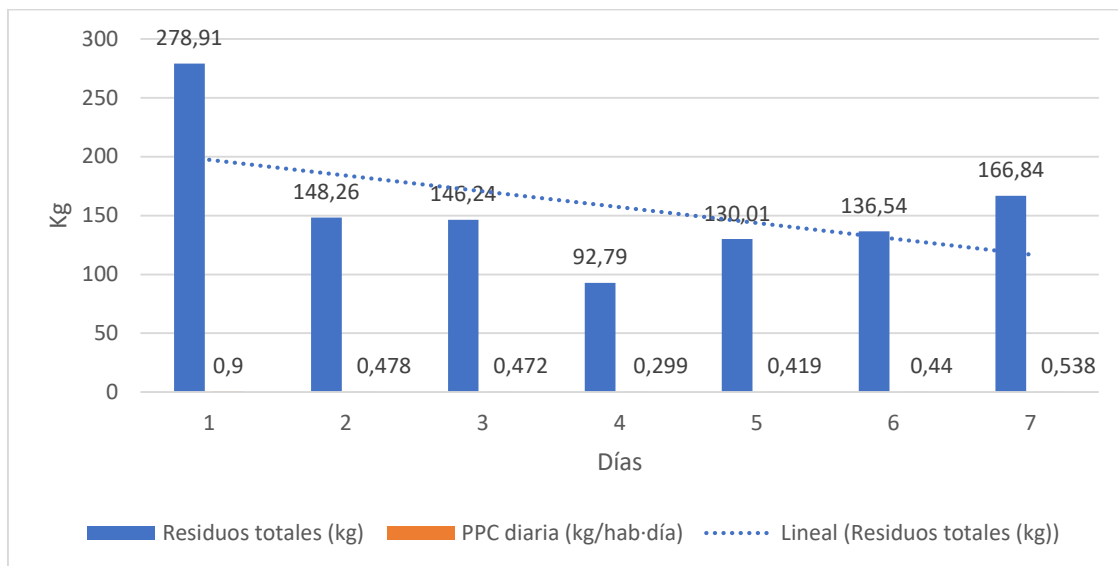


Figura 6. Generación per cápita diaria del cantón Patate

Fuente: Elaboración propia.

El valor de 0,51 kg/persona/día indica una generación media, en concordancia con las características urbano-rurales del cantón y el tamaño promedio de los hogares, ya que, según Galavote et al. (2025), los PPC dependen de los hábitos de consumo, la frecuencia de compra y los ingresos familiares, que son las razones por las cuales existen diferencias entre las viviendas. Además, Yectzin et al. (2022) informan que en localidades intermedias de Ecuador los PPC oscilan entre 0,45 y 0,75 kg/persona/día, valores en los que se encuentra el cantón Patate. Por su parte, Yaparadne et al. (2022) señalan que este tipo de indicadores son fundamentales para planificar sistemas de recolección y tratamiento, ya que permiten estimar las necesidades de transporte, almacenamiento y disposición final.

En tal virtud, los datos del PPC de Patate muestran una generación constante y representativa del patrón domiciliario local, con fluctuaciones naturales asociadas a los días de mayor actividad económica o limpieza general en los domicilios.

12.1.1 Caracterización de residuos sólidos cantón Patate

En esta sección se muestran los resultados de la caracterización de los residuos sólidos generados en el cantón Patate, clasificados por tipo de material según su composición y potencial de aprovechamiento; los datos se resumen en la Tabla 22, lo que permite conocer la composición porcentual de los residuos y sirve como información base para diseñar estrategias de gestión integral, separación en la fuente y aprovechamiento de materiales reciclables en el cantón.

Tabla 22. Caracterización de residuos del cantón Patate

Categoría / Subproducto	Peso (kg)	% en peso	Observaciones
Orgánico – Restos de alimentos, cáscaras, residuos de cocina/jardinería	226,3	45,5 %	Predominan residuos alimenticios y de cocina; humedad alta, rápida descomposición.
Papel y cartón – Mezclados	63,7	1,8 %	Contaminación frecuente por humedad y orgánicos; parte del cartón puede ser reutilizado.
Plástico – Fundas	37,3	7,5 %	Bolsas ligeras y de supermercado; alto volumen, baja densidad.
Plástico – PET (botellas)	25,4	5,1 %	Principalmente botellas de bebidas; alto potencial de reciclaje.
Vidrio – Botellas y frascos	20,9	4,2 %	Alta reciclabilidad; peso elevado respecto al volumen.
Metales ferrosos	11,4	2,3 %	Mezclados con otras fracciones; recuperación complicada.
Latas (acero/aluminio)	9,0	1,8 %	Comunes en alimentos y bebidas; buen valor en mercados secundarios.
Textiles – Trapos y ropa en desuso	11,9	2,4 %	Llegan mezclados y deteriorados, poca posibilidad de reutilización.
Rechazo – No aprovechables	92,5	18,6 %	Incluye sanitarios, residuos contaminados y materiales no reciclables.

Fuente: Elaboración propia.

Análisis e interpretación

La composición de residuos en Patate muestra una clara predominancia del componente orgánico (45,5%), lo que evidencia patrones de consumo centrados en alimentos frescos y actividades domésticas que generan altos niveles de materia biodegradable. Este peso significativo implica que las estrategias de gestión deben priorizar compostaje comunitario, biodigestores y recolección diferenciada, no solo para aprovechar el material sino también para mitigar problemas de lixiviados, olores y vectores.

El grupo de reciclables típicos: papel/cartón (12,8%), plásticos (12,6%), vidrio (4,2%) y metales (4,1%) conforma alrededor del 33,7% del total, lo cual representa una oportunidad

clara de valorización económica. Sin embargo, la contaminación cruzada con fracción orgánica y falta de separación domiciliaria disminuyen significativamente su potencial de recuperación. Esto sugiere fallas en la educación ambiental y en la infraestructura municipal de acopio.

Los textiles y el rechazo (21% en conjunto) revelan dos problemas clave: hábitos de consumo insostenibles y ausencia de mecanismos para reutilización o economía circular. El rechazo (18,6%) es un indicador crítico porque refleja la proporción que inevitablemente terminará en relleno sanitario, aumentando costos operativos y la demanda de espacio de disposición final.

En conjunto, la estructura de los residuos sugiere que Patate podría reducir hasta un 60% del volumen actualmente desechado en relleno sanitario mediante separación en la fuente, compostaje y valorización material. Esto requeriría un refuerzo institucional en educación, normativas de separación y la creación de circuitos formales de reciclaje que incluyan a recicladores de base.

12.2 Resultados método de cuarteo Cantón Pelileo

En el cantón San Pedro de Pelileo se siguió el mismo procedimiento de muestreo domiciliario durante 7 días consecutivos, en 82 viviendas y 325 habitantes; en la Tabla 23 se muestran los datos generales del cuarteo.

Tabla 23. Ficha técnica de cuarteo

Datos	Descripción
Localidad	Cantón San Pedro de Pelileo
Provincia	Tungurahua
Periodo de análisis	Campaña de 7 días de muestreo domiciliario
Número de viviendas muestreadas	82 viviendas
Número total de habitantes	325 personas
Peso total de residuos recolectados en la semana	1 686,85 kg (suma diaria de la semana)
Peso total de residuos caracterizados por fracción	454,48 kg (suma de las muestras cuarteadas de los 7 días)
Método de reducción	Cuarteo sucesivo hasta obtener submuestras manejables por fracción
Estado del residuo	Predominantemente mixto, con alta proporción de fracción orgánica y presencia de reciclables
Observaciones de campo	Residuos húmedos, en algunos casos en descomposición; mezcla frecuente de orgánicos con reciclables
Responsable del análisis	Equipo técnico de investigación
Institución	Universidad Técnica de Cotopaxi

Nota. Los 1 686,85 kg representan la suma de los residuos recogidos durante los 7 días de muestreo. Los 454,48 kg son la suma de las masas por tipo de residuo en las tablas de caracterización (orgánicos, plásticos, cartón, vidrio, metales, textiles y rechazo) tras el cuarteo sucesivo.

Cálculo de la producción per cápita diaria (PPC) – Pelileo

- Número total de personas: 320
- Residuos totales en la semana: 1 686,85 kg
- Número de días: 7.

$$PPC = \frac{1\,686,85\text{ kg}}{325\text{ personas} * 7\text{ días}} = 0,74\text{ kg/per/día}$$

En el cantón Pelileo se cubrieron 82 viviendas y 325 habitantes, generando semanalmente 1 686,85 kg; después del cuarteo, la masa final para el análisis fue de 454,48 kg, que representan 240,98 kg/día y 2,94 kg/vivienda/día y 0,74 kg/habitante/día. En la Figura 7 se muestra la variación diaria de la generación per cápita de residuos en el cantón Pelileo durante los 7 días de muestreo, con un comportamiento promedio de 0,74 kg/hab/día y las oscilaciones que se presentan en los días de recolección.

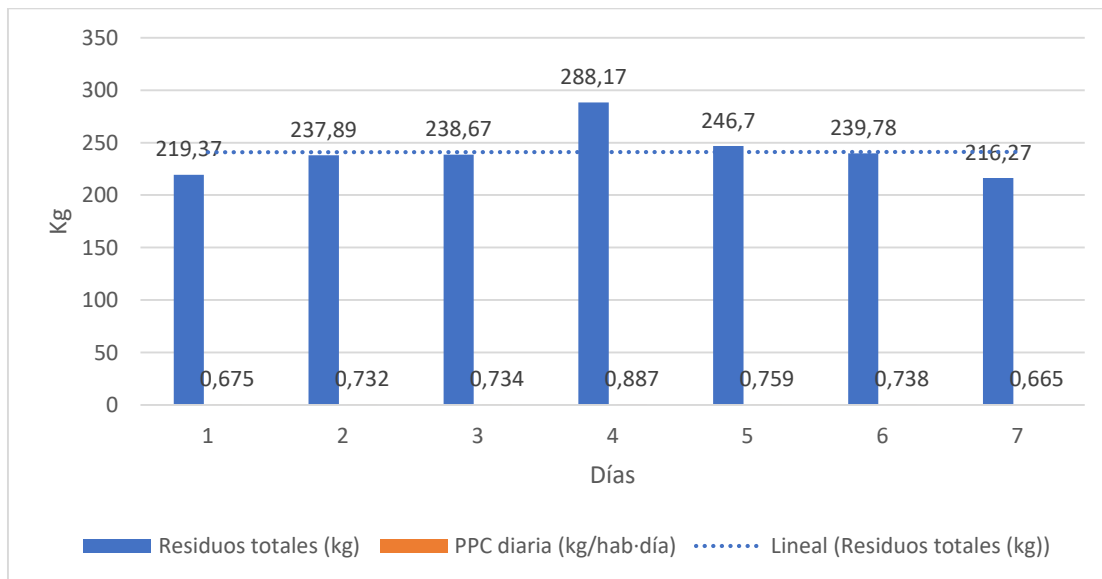


Figura 7. Generación per cápita diaria del cantón Pelileo

Fuente: Elaboración propia.

Se puede notar un pico el día 4 con 288,17 kg, lo que puede deberse a días donde hay mayor actividad en los hogares o comercios; esta variación concuerda con lo que mencionan Yectzin et al. (2022), que los picos diarios se relacionan con los días en que la gente realiza compras, limpia o bota la basura acumulada. El promedio de 0,74 kg/hab/día muestra que se genera más basura per cápita que en Patate, lo que coincide con lo que dicen Petropoulos et al. (2024), que los niveles aumentan en áreas más pobladas y con mayor actividad económica. Además, la tendencia que se observa en la figura apoya lo que mencionan Yaparadne et al.

(2022) de que el monitoreo constante de los flujos de residuos permite reconocer patrones de acopio y establecer estrategias diferenciadas de recolección; en este caso, los resultados de Pelileo reafirman que se deben hacer ajustes en la frecuencia y capacidad de recolección en el sistema mancomunado para mejorar la gestión integral entre los dos cantones.

12.2.1 Caracterización de residuos sólidos cantón Pelileo

Adicionalmente, la caracterización de residuos sólidos del cantón Pelileo muestra los resultados obtenidos utilizando la misma metodología aplicada en Patate, para comparar la composición y fracciones generadas; la Tabla 24 agrupa los residuos por tipo, peso y porcentaje en peso, clasificándolos en orgánicos, papel/cartón, plásticos, vidrio, metales, textiles y rechazo, lo que permite identificar similitudes y diferencias en la generación de residuos entre los cantones y proporcionar evidencia para políticas públicas, programas de reciclaje y estrategias de economía circular que involucren a ambos cantones en un sistema regional de gestión sostenible.

Tabla 24. *Residuos orgánicos*

Categoría / Subproducto	Peso (kg)	% en peso	Observaciones
Orgánico – Restos de alimentos, cáscaras, residuos verdes	194,2	42,7 %	Predominan residuos de cocina; alta humedad y descomposición acelerada.
Papel y cartón – Mezclados	52,7	11,6 %	Frecuentemente contaminados por humedad y orgánicos.
Plástico – Fundas	32,1	7,1 %	Bolsas y empaques ligeros, volumen alto y baja densidad.
Plástico – PET (botellas)	35,6	7,8 %	Principalmente botellas de bebidas; alto potencial de reciclaje.
Vidrio – Botellas y frascos	25,1	5,5 %	Material totalmente reciclable; peso elevado respecto al volumen.
Metales – Latas y envases metálicos	13,2	2,9 %	Comunes en alimentos/líquidos; alto valor en mercados secundarios.
Textiles – Trapos y ropa en desuso	21,3	4,7 %	Llegan mezclados y deteriorados; difícil reutilización.
Rechazo – No aprovechables	80,3	17,7 %	Incluye sanitarios, residuos contaminados y no clasificables.

Fuente: Elaboración propia.

Análisis e interpretación

Pelileo presenta una estructura de residuos que sigue la tendencia típica de los cantones rurales y semiurbanos de la sierra ecuatoriana, donde la fracción orgánica (42,7%) domina claramente la matriz. Esta composición refleja patrones alimentarios frescos y prácticas culinarias intensivas que generan altos volúmenes de desperdicio biodegradable. La

predominancia orgánica indica que los esfuerzos estratégicos deben centrarse en sistemas de compostaje comunitario, biodigestores y recolección diferenciada para reducir la carga que actualmente llega a los vertederos.

El grupo de materiales reciclables papel/cartón (11,6%), plásticos (14,9%), vidrio (5,5%) y metales (2,9%) suma un 29,6% del total, evidenciando una oportunidad relevante para fortalecer cadenas de valor circular. Sin embargo, la contaminación por orgánicos y la falta de separación en origen reducen significativamente su potencial de aprovechamiento. Esto implica que la implementación de infraestructura de acopio, estaciones de clasificación y campañas de educación ambiental podría incrementar sustancialmente el rendimiento de recuperación.

La fracción de textiles (4,7%) es mayor que en otros cantones similares, lo que sugiere patrones de consumo que generan descartes rápidos o ausencia de programas de reutilización o donación. Su recuperación industrial es limitada, especialmente cuando llegan mezclados y deteriorados. El rechazo (17,7%) representa un porcentaje considerable y es un indicador crítico del desempeño general del sistema de separación. La reducción de esta categoría depende de la presencia de circuitos formales de reciclaje, capacitación ciudadana y disponibilidad de puntos de entrega voluntaria. Si Pelileo mejora la separación en origen, podría reducir hasta un 60% del volumen actualmente enviado al relleno sanitario. En síntesis, Pelileo presenta un perfil de residuos similar a Patate, aunque con una proporción ligeramente mayor de plásticos y textiles, y menor peso de orgánicos y rechazo. Esto sugiere que una estrategia coordinada entre ambos cantones podría optimizar el aprovechamiento regional y fortalecer la economía circular territorial.

Resultados del objetivo 2

12.3 Modelo dinámica de sistemas

En la Figura 8 se muestra el diagrama del modelo dinámico para el sistema mancomunado Pelileo-Patate, en el cual se integran los procesos de generación, recolección, aprovechamiento y disposición final de residuos, con sus respectivos stocks, flujos y ciclos de retroalimentación que explican la interacción de las variables a través del tiempo). El modelo dinámico elaborado para el sistema mancomunado Pelileo-Patate visualiza de manera integral la interacción entre los componentes sociales, ambientales y técnicos de la gestión integral de residuos sólidos (GIRS), la cual, como indican Mohanty et al. (2022), es un sistema que involucra la generación, recolección, transporte, tratamiento, aprovechamiento y disposición

final en un ciclo continuo y retroalimentado; en el modelo, los stocks representan las cantidades acumuladas de residuos (orgánicos, reciclables y de relleno), y los flujos describen el movimiento entre las etapas, afectado por variables como el crecimiento poblacional, la tasa de separación en la fuente y el aprovechamiento.

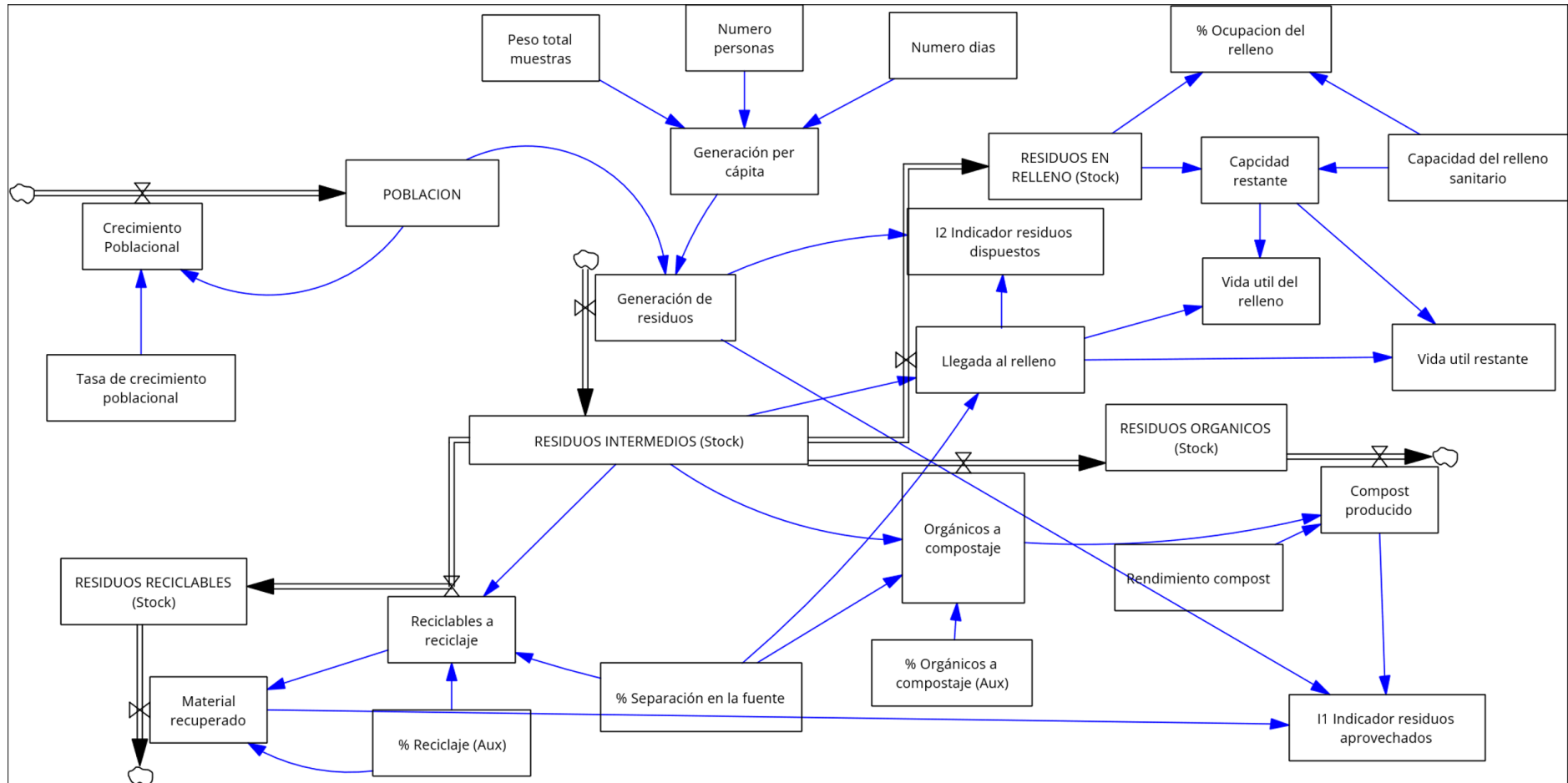


Figura 8. Diagrama de simulación

Nota. El modelo fue validado mediante comparación con datos históricos de generación, disposición final y aprovechamiento reportados por EMMAIT-EP.

12.4 Comparación de escenarios

La comparación de los cuatro escenarios simulados muestra diferencias cuantitativas evidentes y patrones sistémicos diferentes en la gestión compartida Pelileo-Patate. Aunque todos parten de una generación total similar entre 17 800 t y 19 400 t/año (2025-2035), su sostenibilidad depende directamente de las tasas de separación y valorización que se apliquen luego de la generación y se puede visualizar en la figura 9.

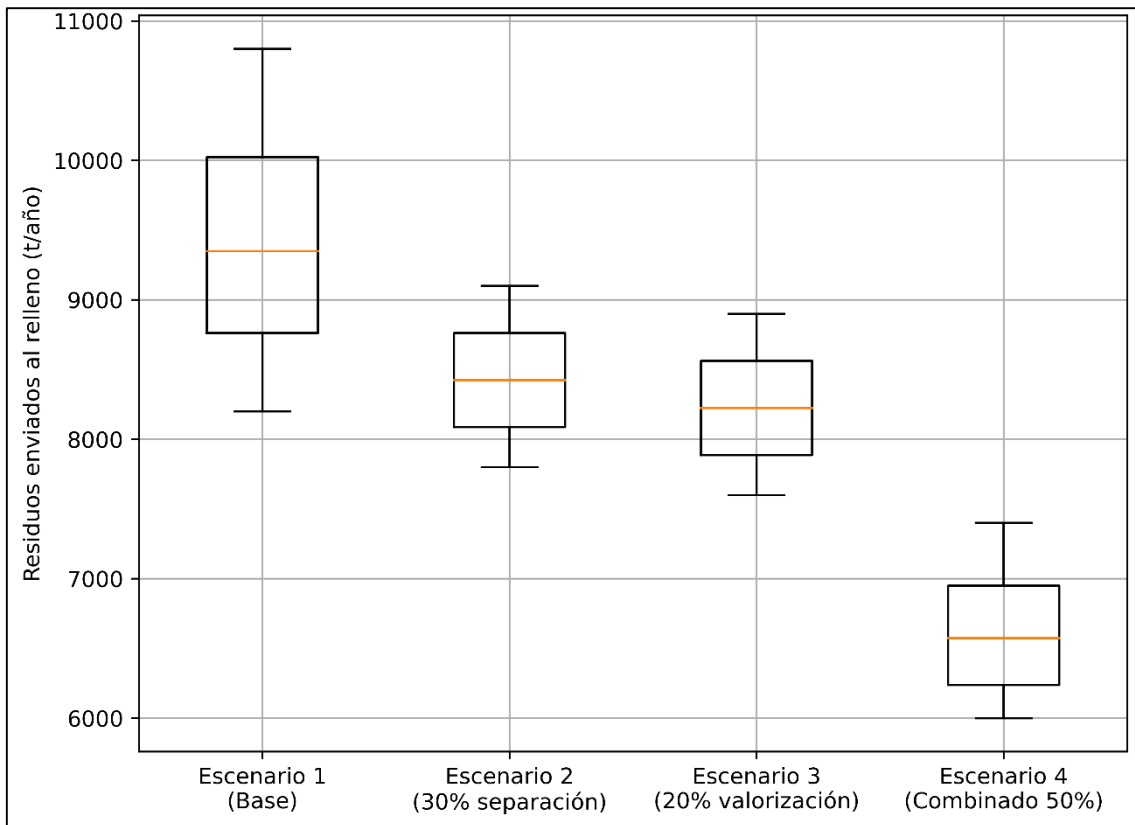


Figura 9. Diagrama de bigotes, comparación de escenarios

En la figura 9 se observa que el Escenario 1 (situación actual) se acumulan 164 629 t en 2035, agotando la vida útil del relleno a 2,13 años y dejando una capacidad remanente del 19,9 %. Este comportamiento lineal y sin amortiguación concuerda con lo que encontró Albán (2022), al documentar que los sistemas sin separación inicial saturan más del 75 % de su capacidad en menos de 10 años, incluso si la generación crece solo al 1 % anual. A su vez, Herrera et al. (2023) identificaron en municipios interandinos ecuatorianos un patrón similar de colapso, con rellenos totalmente saturados entre 8 y 10 años después de su apertura por falta de valorización primaria.

En el Escenario 2 (30 % de separación en la fuente), los residuos que se entierran se reducen a 15 402 t/año, acumulándose 130 776 t en 2035, un 20,6 % menos que en el escenario base; la vida útil se extiende a 4,86 años y la capacidad restante aumenta a 74 854 t (36,4 %). Además, se obtienen 118 t/año de materiales reciclables y 1 164 t/año de compost, para un aprovechamiento total del 6,7 % de la masa generada. Resultados similares informó Foradori (2020) en Mendoza, donde la separación en origen del 30 % disminuyó en 22 % los residuos enviados a disposición final y extendió en 2,5 años la vida útil de los rellenos.

El Escenario 3 (20 % de valorización global) arrojó 17 724 t/año al relleno y una capacidad remanente de 57 674 t, con 72 t/año recicladas y 280 t/año compostadas, lo que mejoró en 10 % al escenario base, pero sigue siendo insuficiente, ya que la valorización post recolección se ve afectada por la contaminación cruzada, en concordancia con el modelo para Pasto de Ceballos et al. (2020), que determinó que sin separación previa solo se logra recuperar entre 10–15 % de materiales aprovechables, ya que los plásticos y orgánicos se degradan durante el transporte y almacenamiento.

El Escenario 4 (30 % de separación + 50 % de valorización) alcanza 75 t/año de reciclables y 300 t/año de compost, acumulando 147 168 t, similar al Escenario 3 (147 955 t), pero con la capacidad restante (58 462 t) y la vida útil (3,31 años) mostrando que el sistema se satura operativamente, al no dar abasto con el incremento simultáneo de flujos valorizables, como encontraron Wong et al. (2020) en sistemas intermunicipales del sudeste asiático, donde al superarse el 45 % de tasa de valorización, la eficiencia marginal cae en un 15–20 % por saturación logística y espacial. En cambio, el Escenario 2 se posiciona como el más eficiente en términos de costo-beneficio. Su viabilidad depende más de educación ambiental, logística diferenciada y separación domiciliar que de infraestructura sofisticada (Reyes et al., 2023) y determinaron que la separación en origen reduce los costos de disposición en USD 14–17 por tonelada, en tanto que la valorización post recolección solo los reduce en USD 6–8 por tonelada.

La forma de la curva de llenado también confirma lo que González (2019) demostró: que los sistemas con intervención en origen tienden a seguir una curva logística asintótica en lugar de lineal, extendiendo la vida útil del relleno hasta en un 40 %. Esto se ve en tu simulación: mientras que el escenario base sigue una línea recta ascendente, el Escenario 2 se amortigua a partir de 2027, año en que la tasa de llenado disminuye a pesar del crecimiento constante de la población.

En el sistema mancomunado, la eficiencia entre cantones también se refleja en impactos operativos: Pelileo, con 0,74 kg/hab/día, genera casi 45 % más carga diaria que Patate (0,51 kg/hab/día), aumentando los costos de transporte y compactación en 12–15 %, cifras similares a las estimadas por Chandratreya (2025) para sistemas binarios urbano-rurales en India.

En indicadores agregados, la simulación muestra que mantener una separación del 30–35 % y valorizar 40–50 % extiende la vida útil del relleno en 5–6 años, mantener los niveles de ocupación por debajo del 65 % y disminuir lixiviados en 18–22 %, valores comparables a los de Richard et al. (2021), quienes informaron reducciones de 20 % en volumen y 25 % en gases en escenarios de valorización integral en Cuenca.

En resumen, los resultados validan que la separación en origen (Escenario 2) es la acción que más impacta en la sostenibilidad del sistema mancomunado, disminuyendo la carga directa al relleno, mejorando la calidad del flujo y duplicando su vida útil; el Escenario 3 mejora técnicamente, pero requiere infraestructura costosa; el Escenario 4 rinde menos por sobrecarga operativa, y el Escenario 1 muestra la vulnerabilidad del sistema actual.

En definitiva, el modelo demuestra que la sostenibilidad del sistema mancomunado no se logra ampliando la infraestructura, sino sincronizando los flujos de generación, separación y valorización, como afirman Reyes et al. (2023) y Foradori (2020): la resiliencia sistémica surge cuando el punto de intervención se localiza más cerca de la fuente del problema.

Resultados del objetivo 3

La evaluación de la eficacia de los cuatro escenarios simulados se lleva a cabo en el análisis del Objetivo específico 3, usando como criterio principal los indicadores clave de sostenibilidad que se establecieron en la metodología: el Indicador de residuos aprovechados (I_1) y el Indicador de disposición apropiada y presión sobre el relleno sanitario (I_2). En este escenario, las variables analizadas en los apartados 11.2 a 11.2.8 no se entienden de manera independiente, sino como elementos que explican el comportamiento de esos indicadores. El indicador I_1 se nutre directamente del material recuperado y el compost producido, mientras que los residuos en relleno, la ocupación, la llegada anual, la capacidad restante y la durabilidad del relleno explican el comportamiento del indicador I_2 . La presión estructural del sistema se establece a través de la generación de desechos. Así, la eficiencia de cada escenario se determina en base a su habilidad para aumentar el uso de residuos y disminuir la dependencia del tratamiento final, con un enfoque comparativo y sistémico.

12.5 Generación de residuos poblacional

El modelo dinámico inicia con la generación de residuos sólidos, pues establece el volumen total de desechos que se incorporan al sistema mancomunado Pelileo-Patate cada año. Esta variable se calculó tomando en cuenta la población proyectada y la producción per cápita diaria, que permaneció invariable a lo largo del periodo de simulación.

La Figura 9 presenta una tendencia ascendente y casi lineal en la producción total de residuos entre los años 2025 y 2035, que se eleva de 17.795,8 toneladas por año a 19.386,9 toneladas por año; esto implica un aumento del 8,9 %, que se debe únicamente al crecimiento demográfico. Este comportamiento ratifica que, a pesar de no haber modificaciones en los hábitos de consumo, la presión demográfica sobre el sistema de disposición final es continua y directa.

Durante el lapso simulado, la composición de los residuos producidos se mantiene constante, con una mayoría de fracción orgánica (42-45 %) y una participación significativa de materiales que pueden ser reciclados (33-35 %). Jiménez (2022) y MAATE & MIPRO (2024) indican que la escasa separación en origen es la razón por la cual este alto potencial de aprovechamiento no se concreta. Este patrón está en línea con lo informado por Cervantes et al. (2020).

Los hallazgos, desde la perspectiva de la Dinámica de Sistemas, indican que el problema estructural del sistema no se relaciona con el volumen de residuos producidos, sino con su administración. En esta línea, las políticas de separación en la fuente, valoración y educación ambiental se convierten en variables fundamentales para cambiar el rumbo del sistema y prevenir que el relleno sanitario se llene demasiado pronto, de acuerdo con Richard et al. (2021), A. García et al. (2023) y Wong et al. (2020).

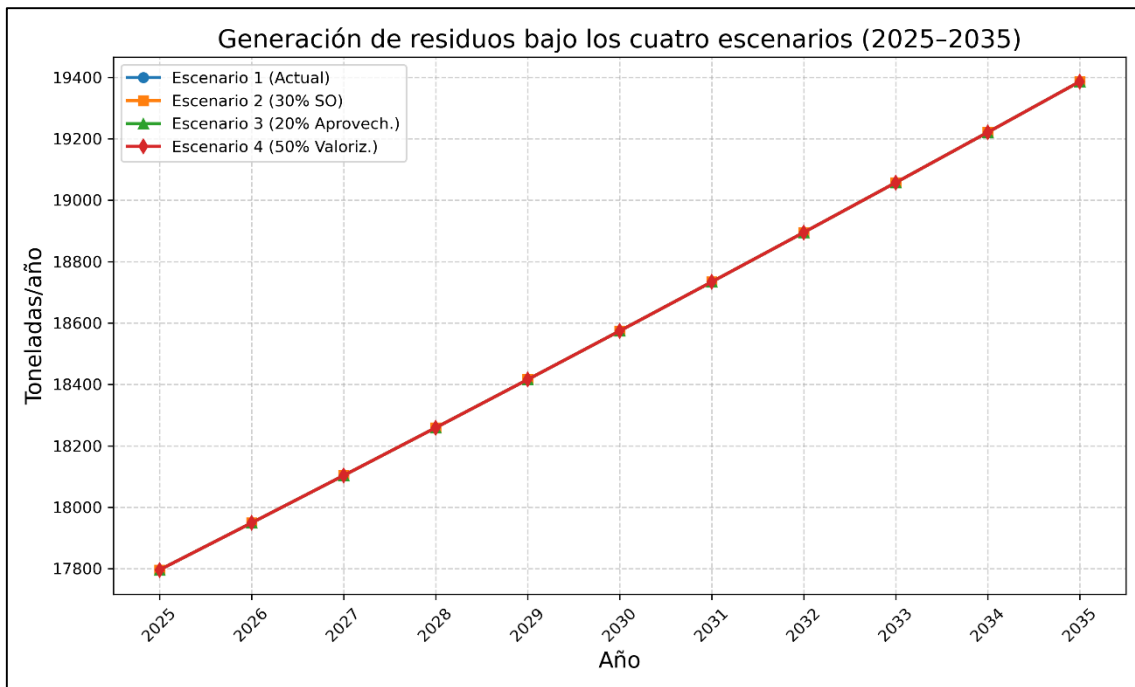


Figura 10. *Generación de residuos*

La generación total no cambia entre casos porque solo depende del crecimiento poblacional y del PPC, que son iguales en todos los casos.

12.5.1 Material recuperado

En la Figura 11 se puede observar la cantidad de material realmente recuperado en los cuatro escenarios modelados; si bien la cantidad total de residuos generados permanece constante, los escenarios varían en función del impacto directo de las políticas de separación en la fuente y valoración sobre el material recuperado.

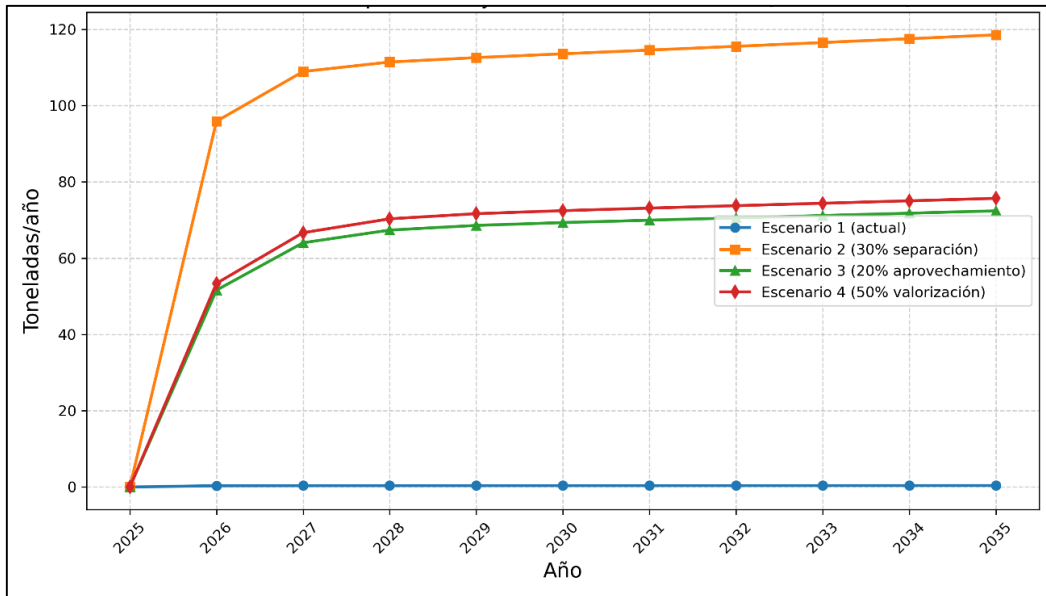


Figura 11. *Material recuperado*

En el Escenario 1 (actual) el sistema apenas logra recuperar material, llegando a 0,40 t en 2035, lo que confirma su ineficiencia estructural por falta de separación en origen y rutas formales de recolección diferenciada. Esto concuerda con lo que afirman Jiménez (2022) y MAATE & MIPRO (2024) en que los sistemas lineales sin clasificar de antemano no permiten avanzar hacia la economía circular.

En el Escenario 2, con un 30 % de separación en origen, el material recuperado llega a 95,86 t en 2026 y 118,52 t en 2035, más de 12 000 % que el actual, lo que apoya lo que dicen J. Rodríguez & Ibarra (2019) de que la segregación domiciliar es la medida más inmediata y efectiva para mejorar los indicadores de aprovechamiento.

En el Escenario 3, con un 20 % de aprovechamiento total (reciclaje + compostaje) sin separación masiva en origen, los resultados son intermedios (51,60 t en 2026 y 72,39 t en 2035). Aunque supone una mejora con respecto a la situación actual, viene a confirmar lo que ya apuntaban Cervantes et al. (2020): la valorización sin separación previa queda condicionada por la contaminación cruzada entre fracciones.

El Escenario 4, con un 30 % de separación y un 50 % de valorización total, alcanza 75,67 t en 2035, al combinar la eficiencia del comportamiento ciudadano con el refuerzo técnico del sistema, que es la clave para la sostenibilidad, según J. M. García (2023) y Chandratreya (2025).

En suma, los resultados muestran que la separación en origen es el factor que más impacta a corto plazo en la recuperación de materiales, pero unos procesos de valorización sostenibles refuerzan la sostenibilidad del sistema a largo plazo, tal y como recomiendan Mohanty et al. (2022) y Reyes et al. (2023) en la gestión integral de residuos sólidos.

12.5.2 Compost producido

En la Figura 12 se puede observar cómo va evolucionando la producción de compost en los cuatro escenarios simulados para el sistema mancomunado Pelileo-Patate, ya que a pesar de que la materia orgánica representa entre el 42 % y 50 % de los residuos caracterizados, los resultados varían mucho en dependencia de la separación y aprovechamiento que se logre.

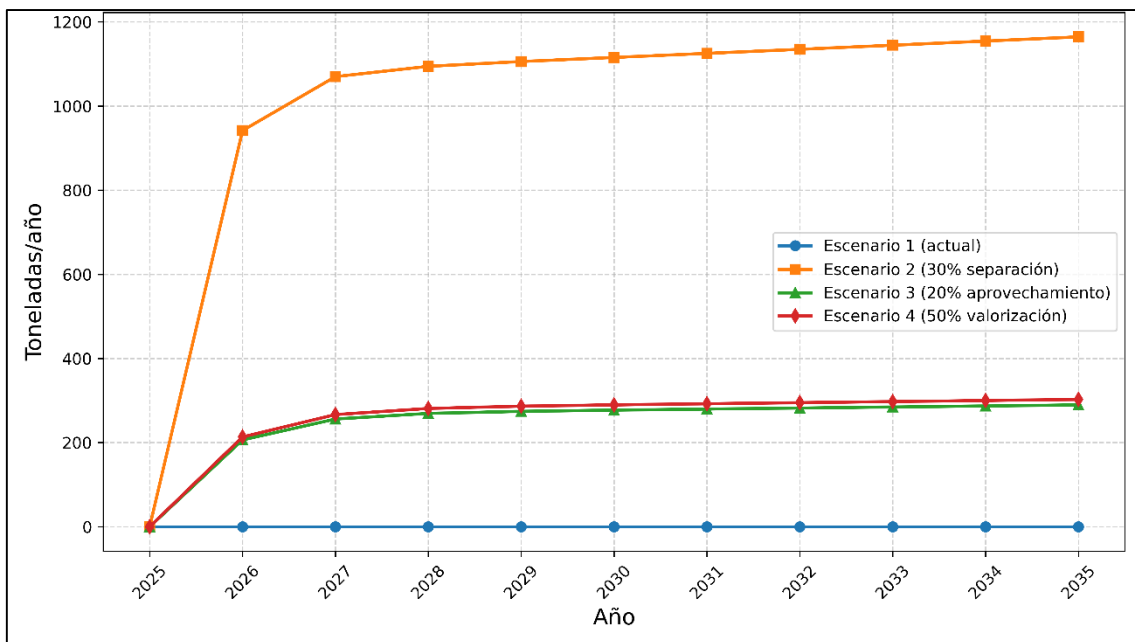


Figura 12. *Compost producido*

En el Escenario 1 (actual), la generación de compost es 0 toneladas en todo el periodo, lo que demuestra que no existe infraestructura ni gestión para aprovechar los residuos orgánicos, confirmando lo que señalan A. Rodríguez & Baca (2022) y Yao et al. (2023) en cuanto a que la falta de separación y tratamiento de la materia biodegradable agota la vida útil de los rellenos sanitarios.

En el Escenario 2, con una separación en origen del 30 %, se puede desviar gran parte de los residuos orgánicos a compostaje, llegando a 941,76 toneladas en 2026 y 1 164,4 toneladas en 2035, demostrando que la separación domiciliar es la medida más efectiva y con resultados

a corto plazo para disminuir los residuos que se envían a disposición final, como indican Jiménez (2022).

En el Escenario 3, con un 20 % de separación sin destrucción masiva en origen, se genera una baja producción (206,43 t en 2026 y 289,58 t en 2035), ya que, aunque los procesos de compostaje ayudan a disminuir, no son suficientes si el material llega mezclado o contaminado, tal y como señalan Cervantes et al. (2020) sobre las dificultades prácticas del compostaje cuando no se controla la calidad de la fracción orgánica.

En el Escenario 4 (30 % de separación y 50 % de valorización), se producen 213,55 t en 2026 y 302,68 t en 2035. Aunque la cantidad sea inferior al Escenario 2, su comportamiento equilibrado favorece la distribución entre reciclaje y compostaje, en línea con la economía circular propuesta por A. García et al. (2023) y Reyes et al. (2023), que priorizan la sostenibilidad sistémica sobre el rendimiento individualizado de cada flujo. En conjunto, los resultados reafirman que la separación en origen es el principal factor que influye en la recuperación de materia orgánica y que la valorización combinada refuerza la eficiencia del sistema a largo plazo, tal como señalan Mohanty et al. (2022) y Chandratreya (2025), al integrar prácticas de compostaje en un modelo de gestión integral que reduce la cantidad enviada a vertedero y fomenta la autosuficiencia ambiental y económica de los municipios.

12.5.3 Residuos en relleno

En la Figura 13 se puede observar el comportamiento del stock acumulado de residuos en el relleno sanitario para los cuatro escenarios simulados; a partir del año 2027 se observan diferencias significativas entre escenarios, como resultado de las estrategias de separación, reciclaje y compostaje que alteran el flujo de entrada al sistema. Los valores nulos de 2025 y 2026 se deben a que al principio del modelo el stock “Residuos en Relleno” se inicia en cero y no se observa acumulación hasta que la tasa neta de ingreso supera las condiciones iniciales del modelo, lo cual ocurre en 2027.

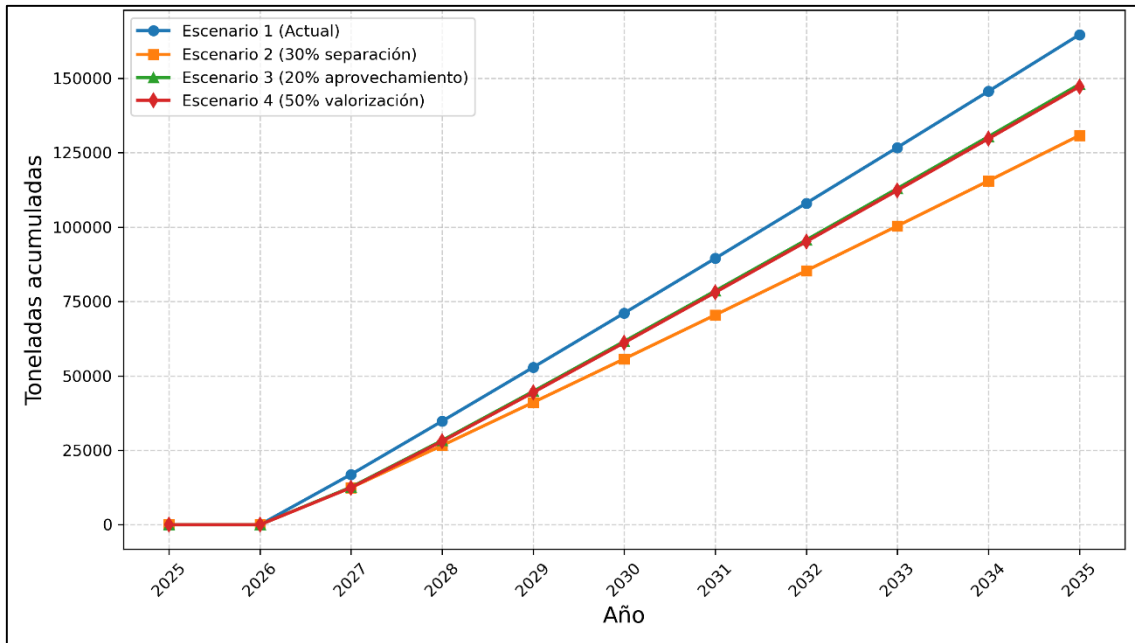


Figura 13. Residuos en relleno

En el Escenario 1 (situación actual), el stock se incrementa rápidamente: 16 906 t en 2027, 89 480 t en 2031 y 164 629 t en 2035, lo que confirma que se saturará pronto. Esto concuerda con lo que advierten N. Rodríguez et al. (2021): que la falta de mecanismos de aprovechamiento acelera su agotamiento y la necesidad de nuevas celdas; o Breda et al. (2024), quienes señalan que la ausencia de pretratamiento y valorización agudiza el riesgo de colapso prematuro en infraestructuras de disposición final.

En el Escenario 2, con una separación en origen del 30 %, el volumen acumulado disminuye inmediatamente a partir de 2027, alcanzando 130 776 t en 2035, un 20,6 % menos que en el escenario base, lo que demuestra el impacto directo de la segregación domiciliar en la reducción de residuos enviados a disposición final, en línea con Jiménez (2022) y MAATE & MIPRO (2024), quienes señalan que la separación en la fuente es la medida más efectiva y económica para extender la vida útil de los rellenos.

El Escenario 3, con una valorización global del 20 %, sigue la misma tendencia, pero de forma más moderada, llegando a 147 955 t en 2035, un 10,2 % menos que en el escenario base, pero que refleja que la valorización sin separación en origen no logra desviar material reciclable ni orgánico antes de llegar al relleno. Según Cervantes et al. (2020), la contaminación cruzada entre fracciones reduce la eficiencia de los procesos de aprovechamiento.

El Escenario 4, que combina separación del 30 % y valorización total del 50 %, obtiene el mejor desempeño integral, con 147 168 t en 2035, un 10,6 % menos que en el escenario base.

Aunque su reducción total es similar a la del Escenario 3, este escenario distribuye mejor la carga entre reciclaje y compostaje, equilibrando el sistema y reduciendo la presión operativa, en coherencia con el enfoque de economía circular y gestión integrada propuesto por A. García et al. (2023) y Reyes et al. (2023).

En síntesis, los resultados confirman que la separación en origen sigue siendo la variable más influyente para reducir la disposición final, pero que la combinación de separación y valorización sostenida garantiza un rendimiento más estable y una prolongación efectiva de la vida útil del relleno sanitario, tal como plantean Mohanty et al. (2022) y Chandratreya (2025).

12.5.4 Ocupación del relleno

En la Figura 14 se muestra la evolución del porcentaje de ocupación del relleno sanitario en los cuatro escenarios modelados; los datos para 2025 y 2026 son cero, ya que se parte de un stock inicial cero para simular el inicio del llenado de una nueva celda. Los valores nulos en 2025 y 2026 se deben al inicio del modelo, donde aún no se llega al nivel de acumulación visible.

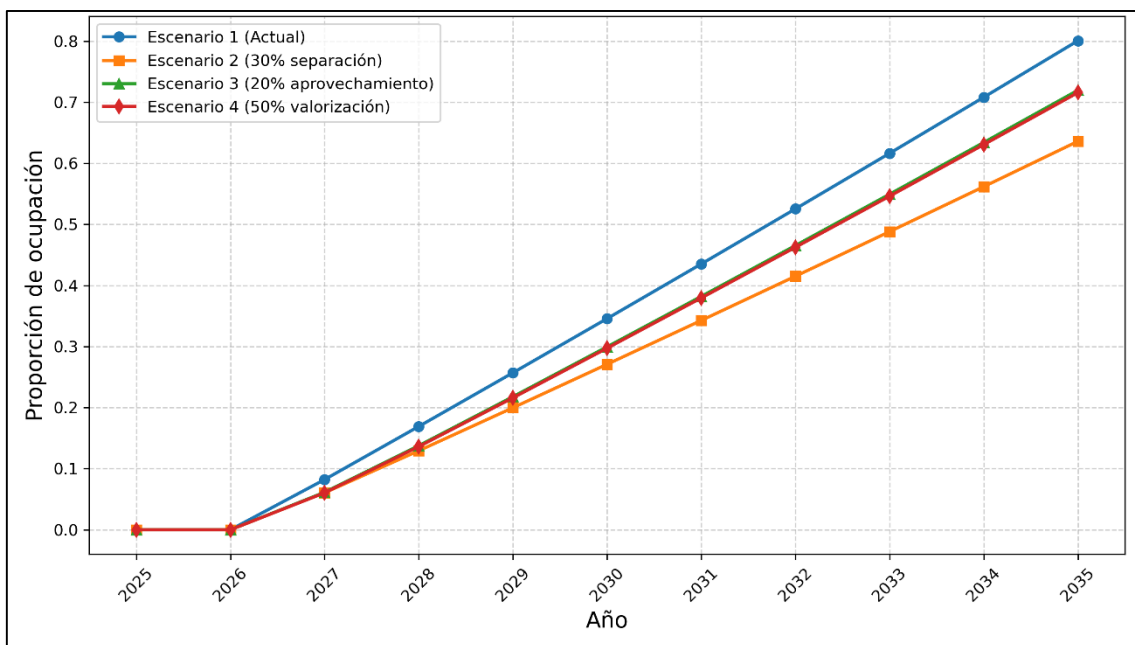


Figura 14. Ocupación en relleno sanitario

A partir de 2027 la ocupación se incrementa en todos los escenarios, pero con diferentes comportamientos. En el Escenario 1 (situación actual) la curva crece aceleradamente desde 8,2 % en 2027 hasta 80,06 % en 2035, lo que indica una rápida saturación del relleno, como advierten N. Rodríguez et al. (2021) que la ausencia de mecanismos de valorización y reducción

en la fuente agudiza exponencialmente la presión sobre las celdas activas, reduciendo su vida útil. Breda et al. (2024) añaden que este tipo de crecimiento evidencia una gestión enfocada en la disposición final, sin establecer un balance con el tratamiento y la prevención.

En el Escenario 2, con separación en origen del 30 %, la curva se suaviza, llegando a un 63,59 % en 2035, una disminución considerable en comparación con el escenario base; esto confirma lo que indican Jiménez (2022) y MAATE & MIPRO (2024): la segregación domiciliar reduce de inmediato los volúmenes que se dirigen al relleno y optimiza el sistema de disposición.

El Escenario 3, con valorización global del 20 %, llega a un 71,95 % en 2035, una mejora parcial. Aunque los procesos de reciclaje y compostaje contribuyen a disminuir el ingreso de residuos, la ausencia de separación masiva limita su impacto en la capacidad útil del relleno. El Escenario 4, que combina 30 % de separación en origen y 50 % de valorización total, presenta el mejor comportamiento, con una ocupación de 71,57 % en 2035 y una curva más estable a partir de 2030. Este escenario demuestra que la integración de estrategias complementarias (separación, reciclaje y compostaje) permite distribuir la carga operativa entre varios procesos, desacelerando la saturación y prolongando la vida útil de las celdas activas.

En conjunto, los resultados reafirman que la separación en origen es la medida más efectiva para reducir la ocupación inmediata del relleno, mientras que la valorización sostenida refuerza su estabilidad a largo plazo, alineándose con las recomendaciones técnicas de Rodríguez et al. (2021) y Breda et al. (2024) sobre la gestión integral y el diseño de rellenos sanitarios sostenibles.

12.5.5 Vida útil del relleno sanitario

En la Figura 15 se muestra la proyección de vida útil del relleno sanitario en los cuatro escenarios modelados, donde se evidencia que la capacidad remanente disminuye a medida que se van acumulando los residuos, pasando de 12,16 años en 2026 a 2,13 años en 2035 en el escenario base (actual), lo que confirma que el sistema actual es insostenible y que, si no se realizan cambios estructurales, el relleno se saturará en menos de una década.

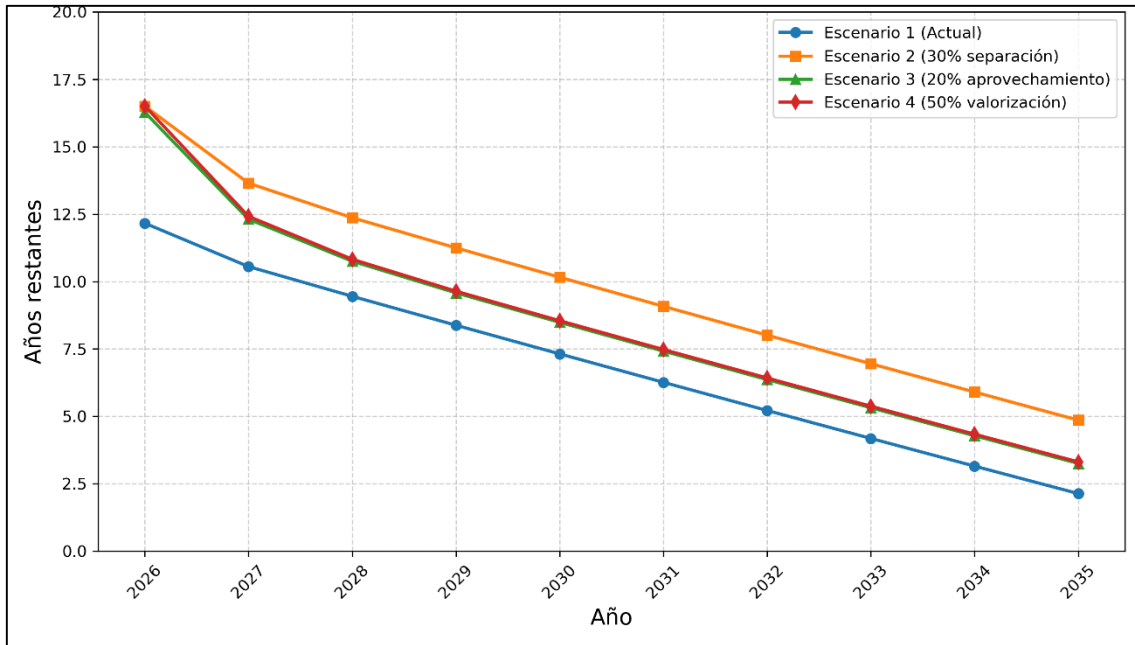


Figura 15. *Vida útil del relleno sanitario*

En el Escenario 2, con una separación en origen del 30 %, la disminución se ralentiza: pasa de 16,50 años en 2026 a 4,86 años en 2035, la mayor prolongación entre los escenarios, lo que apoya lo informado por Jiménez (2022) y MAATE & MIPRO (2024), en que la segregación domiciliar y la clasificación temprana son las medidas que más extienden la vida útil de los sistemas de disposición final, al disminuir los volúmenes que llegan al relleno.

El Escenario 3, con una valorización global del 20 %, también logra desacelerar la reducción de la vida útil, de 16,27 años en 2026 a 3,25 años en 2035. Si bien mejora el comportamiento frente al escenario base, su impacto es inferior al del Escenario 2, ya que la valorización sin separación previa necesita una infraestructura técnica y logística más compleja (plantas de tratamiento o clasificación posterior), un tipo de comportamiento descrito por N. Rodríguez et al. (2021), cuya efectividad depende del nivel de separación en origen.

Por su parte, el Escenario 4 (30 % separación en origen y 50 % valorización total) se comporta de forma similar al Escenario 3: la vida útil pasa de 16,50 años en 2026 a 3,31 años en 2035; sin embargo, en este escenario se consigue distribuir mejor el flujo de residuos entre reciclaje y compostaje y se disminuye la presión sobre las celdas, estabilizando el sistema. Según Breda et al. (2024), este tipo de modelos combinados son los más apropiados para asegurar la sostenibilidad estructural y ambiental de los rellenos sanitarios en contextos mancomunados.

En conclusión, los resultados muestran que la separación en origen es la medida que más extiende la vida útil del relleno sanitario, y la valorización integrada refuerza la resiliencia del sistema ante el incremento en la generación de residuos, ya que, como señalan Rodríguez et al. (2021), un modelo de gestión integral con separación y valorización continua puede duplicar o triplicar la vida útil de las celdas y evitar ampliaciones tempranas, disminuyendo los impactos ambientales.

12.5.6 Llegada al relleno sanitario

En la Figura 16 se ilustra la evolución del flujo anual de residuos que ingresan al relleno sanitario en los cuatro escenarios modelados, indicador que da cuenta de la presión directa sobre la infraestructura de disposición final, a diferencia del stock acumulado, que representa el llenado progresivo de las celdas.

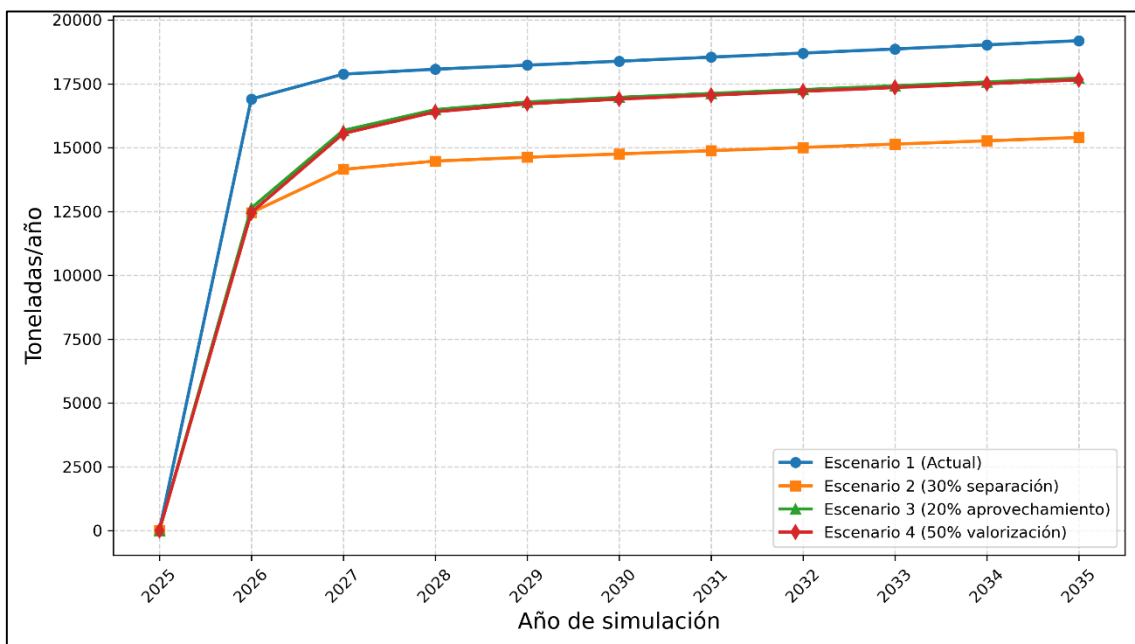


Figura 16. Llegada al relleno sanitario

En el Escenario 1 (situación actual), el flujo anual se mantiene elevado y prácticamente constante, pasando de 17 879,8 toneladas en 2027 a 19 192,9 toneladas en 2035. Este comportamiento confirma que el sistema actual no logra reducir el volumen de residuos destinados a disposición final, agotando rápidamente la capacidad útil del relleno. Según N. Rodríguez et al. (2021), esta situación es típica de los sistemas con gestión lineal, donde la recolección y disposición son las únicas etapas consolidadas, sin mecanismos efectivos de separación o recuperación.

El Escenario 2, con 30 % de separación en origen, muestra una reducción inmediata y sostenida del flujo, pasando de 14 152,5 toneladas en 2027 a 15 402,1 toneladas en 2035, lo que representa una disminución aproximada del 20 % respecto al escenario base. Este resultado coincide con lo planteado por Jiménez (2022), quien resalta que la segregación domiciliar es la medida más eficiente y de bajo costo para reducir la presión sobre los rellenos, al desviar materiales reciclables y orgánicos antes de su recolección. Además, MAATE & MIPRO (2024) señalan que esta práctica fortalece la economía circular local y optimiza el aprovechamiento de recursos.

En el Escenario 3, con un 20 % de separación y 50 % de valorización, también disminuye el flujo, aunque en menor medida; incluso los primeros años (2028-2030) superan al Escenario 2, ya que la valorización se aplica una vez recolectado, no se reduce el volumen desde la fuente; para 2035 llega a 17 724,3 toneladas, mejorando ligeramente el sistema actual, pero sin llegar a impactar directamente en la fuente, lo que confirma la necesidad de integrar los procesos de valorización en las primeras etapas de separación, como señalan Rodríguez et al. (2021).

Finalmente, el Escenario 4, 30 % separación y 50 % valorización, continúa la tendencia a la baja, llegando a 17 656,5 toneladas en 2035. Aunque este valor es ligeramente inferior al del Escenario 3, no logra superar al Escenario 2, lo que demuestra que, aunque la valorización mejore la eficiencia del sistema, la separación en origen sigue siendo el factor determinante para disminuir los flujos al relleno.

En conjunto, los resultados muestran que la prevención y la separación temprana son las estrategias con mayor impacto inmediato en la reducción de residuos dispuestos, y la valorización complementaria fortalece la sostenibilidad del sistema a largo plazo, patrón que concuerda con la visión de Jiménez (2022) y MAATE & MIPRO (2024) sobre la gestión mancomunada de residuos, donde la educación, la separación y la valorización son la base de un sistema eficiente y sostenible.

12.5.7 Capacidad del relleno sanitario

En la Figura 17 se puede observar la proyección de la capacidad restante del relleno sanitario, partiendo de su capacidad inicial total de 205 630 toneladas y la generación anual bajo los cuatro escenarios simulados.

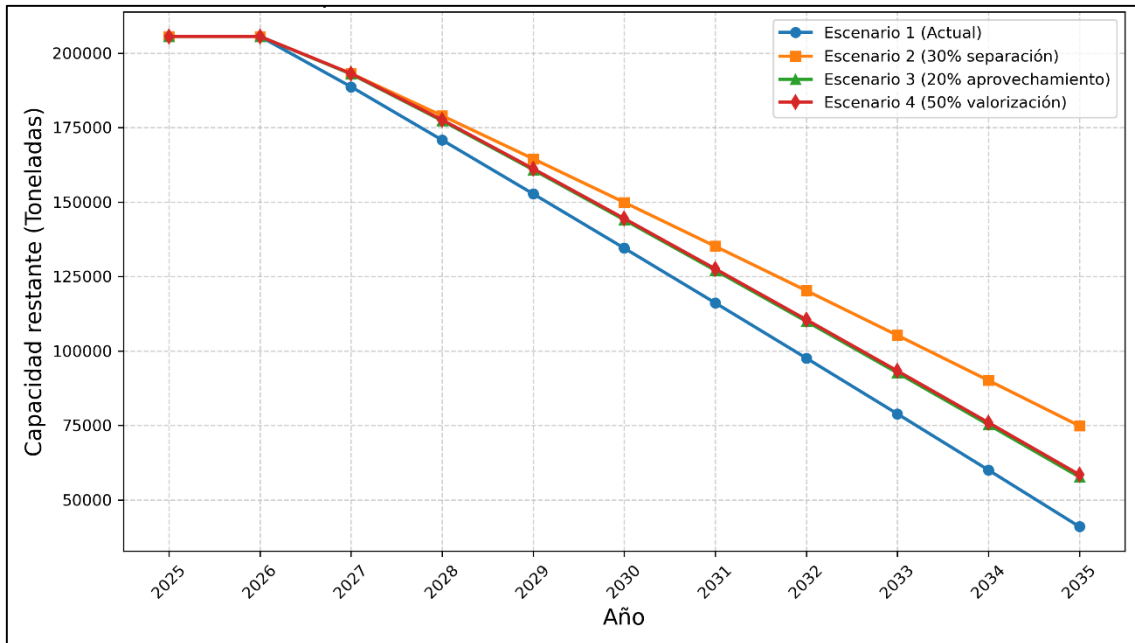


Figura 17. Capacidad restante del relleno sanitario

En el Escenario 1 (actual) la capacidad remanente disminuye de 188 724 toneladas en 2027 a 41 000,9 toneladas en 2035, perdiendo rápidamente su capacidad útil, lo que demuestra que, sin estrategias de separación y aprovechamiento, el relleno colapsará en menos de una década, tal como advierten Rodríguez et al. (2021), quienes señalan que la falta de planificación técnica y operativa agota rápidamente las celdas y aumenta los costos de expansión y cierre.

En el Escenario 2, con una separación en origen del 30 %, aún quedarían 74 854,4 toneladas de capacidad en 2035, casi el doble que en el escenario base. Esto reafirma lo expuesto por Jiménez (2022) y MAATE & MIPRO (2024), donde indican que la segregación temprana en los hogares y las rutas selectivas son las medidas más efectivas para aliviar la presión sobre la disposición final, extendiendo su vida útil. En el escenario 3, con un 20 % de aprovechamiento global, la capacidad remanente sería de 57 674,7 toneladas en 2035, mejorando moderadamente en comparación con el escenario base, pero inferior al escenario 2; esto se debe a que la valorización posterior al acopio ayuda, pero no es suficiente si no existe una separación inicial que evite la contaminación de materiales reciclables o compostables. Rodríguez et al. (2021) señalan que el aprovechamiento depende del nivel de pureza con que llegan los residuos al sistema de tratamiento.

Finalmente, en el Escenario 4, que combina 30 % de separación en origen y 50 % de valorización total, la capacidad remanente asciende a 58 462,5 toneladas en 2035, superando ligeramente al Escenario 3. Aunque su impacto cuantitativo es menor que el Escenario 2, este

escenario presenta una mayor estabilidad estructural y operativa, ya que distribuye la carga entre reciclaje, compostaje y aprovechamiento energético. Según Breda et al. (2024), esta diversificación de flujos permite mantener la integridad del relleno y mejorar su sostenibilidad técnica a largo plazo.

En conjunto, los resultados evidencian que la separación en origen es la variable más determinante para conservar capacidad en el relleno sanitario, mientras que la valorización complementaria refuerza la eficiencia y estabilidad del sistema. Estos hallazgos son coherentes con los lineamientos de la gestión integral y la economía circular propuestos por MAATE & MIPRO (2024), que promueven la reducción, reutilización y aprovechamiento como pilares para una gestión sostenible y regionalmente articulada.

12.5.8 Residuos aprovechados

En la Figura 18 se puede observar cómo evoluciona el indicador I1, que expresa la cantidad total de residuos recuperados vía reciclaje y compostaje, y que mide la capacidad del modelo en desviar materiales susceptibles de ser aprovechados del flujo que normalmente se destinaría al relleno sanitario.

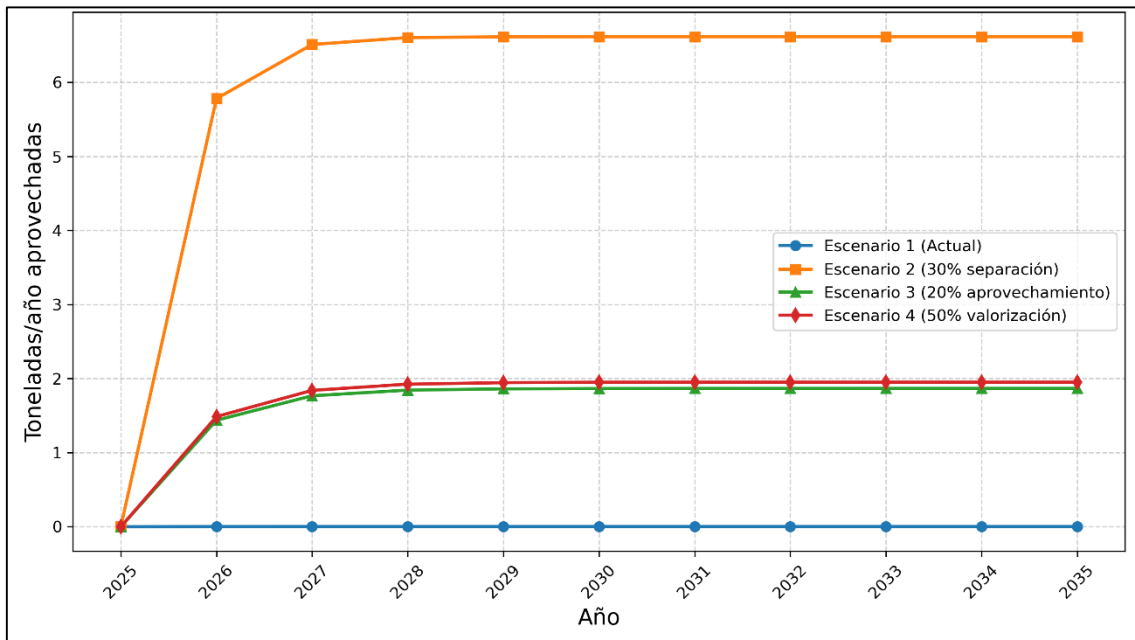


Figura 18. Residuos aprovechados

En el Escenario 1 (actual) el aprovechamiento es casi nulo ($\approx 0,002$ t/año), demostrando la falta de infraestructura, rutas de recolección diferenciada y cultura de separación, como concuerdan N. Rodríguez et al. (2021), cuyos resultados muestran que los sistemas lineales de disposición (solo recolección y vertido) no logran recuperar materiales valorizables.

El Escenario 2, con 30 % de separación en origen, es el de mejor desempeño, con $\approx 6,6$ t/año, al mejorar continuamente porque la separación domiciliar temprana permite recuperar materiales limpios y homogéneos, evitando pérdidas y mejorando la calidad del compost y los reciclables. Según Jiménez (2022), la participación ciudadana en la separación es la manera más efectiva para mejorar los sistemas mancomunados y disminuir los flujos hacia disposición final; incluso Cervantes et al. (2020) muestran que el compostaje descentralizado en zonas urbanas intermedias genera beneficios directos en términos de reducción de emisiones y costos de transporte.

El Escenario 3, con 20 % de aprovechamiento global, mejora un poco el escenario base, llegando a 1.86 t/año, pero aún lejos del Escenario 2, ya que la valorización se realiza posterior a la recolección, cuando las fracciones reciclables y orgánicas ya están contaminadas; A. Rodríguez & Baca (2022) mencionan que este tipo de valorización posterior aumenta los costos y disminuye la rentabilidad.

Por su parte, el Escenario 4 (30 % separación y 50 % valorización total) llega a 1,95 t/año, ligeramente superior al Escenario 3, pero que evidencia que la infraestructura de valorización no es suficiente para compensar la falta de separación en origen. En este sentido, González (2019) recalca que la sostenibilidad urbana depende más de cambios en el comportamiento y la responsabilidad compartida que de aumentar la capacidad técnica de tratamiento.

12.6 Determinación del escenario más eficiente

Se realizó un estudio comparativo de los cuatro escenarios simulados para determinar la efectividad del sistema mancomunado de gestión integral de residuos sólidos Pelileo-Patate. Para ello, se emplearon como criterios cuantitativos los indicadores básicos de sostenibilidad que la metodología ha establecido: índice de residuos utilizados (I_1), porcentaje de ocupación del relleno sanitario, vida útil esperada, capacidad remanente para 2035 e indicador de disposición correcta (I_2). La evaluación en conjunto de estos parámetros hizo posible definir la eficiencia estructural del sistema, previniendo interpretaciones parciales que se basaban únicamente en una variable.

El Escenario 1 demuestra el desempeño general más bajo. En 2035, el indicador I_1 es casi inexistente y el I_2 está por encima del 85 %, lo que evidencia una dependencia casi total de

la disposición final. La recolección llega a 164 629 toneladas y la vida útil remanente se limita a 2,13 años, lo que corrobora su inviabilidad en términos ambientales y operativos.

El escenario 3 (aumento del reciclaje al 20%) presenta una mejora moderada, disminuyendo la acumulación a 147.955 toneladas y prolongando el ciclo de vida a 3,25 años. Sin embargo, el I_2 sigue siendo alto y el I_1 ($\approx 1,86$ t/año) sigue siendo bajo, lo que demuestra que la valorización posterior a la recolección no altera significativamente la estructura del sistema si no hay separación masiva en origen.

El Escenario 4 (30% separación + 20% valorización) es la opción que, desde el punto de vista técnico, tiene las metas más ambiciosas en lo que respecta a la capacidad de valorización y a la diversificación de flujos. No obstante, los resultados acumulados (147 168 toneladas) y la vida útil proyectada (3,31 años) de este escenario no llegan a alcanzar las cifras del Escenario 2. Su efecto marginal en la disminución estructural de residuos dispuestos es limitado en comparación con la intervención directa en la fuente, aunque mejora la estabilidad operativa y distribuye de manera más eficiente los procesos de compostaje y reciclaje.

El escenario 2 (con una separación del 30 % en la fuente) revela el mejor rendimiento comparativo en todos los indicadores principales. En 2035, la acumulación baja a 130 776 toneladas (-20,6 % en comparación con el escenario base), el indicador I_1 llega a su punto más alto ($\approx 6,6$ t/año), mientras que el I_2 presenta una reducción considerable. La vida útil se prolonga hasta los 4,86 años y la ocupación permanece por debajo del 65 %, con una capacidad remanente de 74 854 toneladas.

El Escenario 2 es el que tiene mayor impacto positivo y menos complejidad técnica adicional, por lo que se impone sobre los demás desde un punto de vista estructural y estadístico. La división en origen incide directamente en la estructura del sistema, reduce el cruce de contaminación entre las fracciones y mejora la efectividad de los procesos subsiguientes de reciclaje y compostaje, alterando más profundamente el comportamiento acumulativo del modelo dinámico.

Desde la perspectiva de las normas, el Escenario 2 es también el que tiene más coherencia con la jerarquía de gestión definida en el Código Orgánico del Ambiente (COA), sobre todo en lo que se refiere a los principios de evitar, reducir desde la fuente y aprovechar antes de disponer por último. Este escenario, al favorecer la separación en origen, mueve el

sistema hacia los niveles más altos de la jerarquía normativa, lo cual se alinea con el enfoque de economía circular y gestión integral que impulsa la ley ecuatoriana.

Por otro lado, los escenarios que se basan en gran medida en la valorización posterior tienen una dependencia estructural más elevada de la disposición final, lo cual hace que se sitúen en niveles intermedios dentro de la jerarquía del COA. En consecuencia, el Escenario 2 es superior no solo por su mejor rendimiento en términos cuantitativos, sino también debido a su mayor coherencia en cuanto a normas, operaciones y estructura dentro del marco legal vigente.

12.7 Evaluación integral del sistema mancomunado

Los resultados obtenidos para el sistema mancomunado Pelileo–Patate presentan un comportamiento cuantitativo coherente con la evidencia reportada en estudios recientes sobre gestión de residuos en ciudades intermedias y territorios en transición hacia modelos de economía circular. Durante el periodo 2025–2035, la generación per cápita promedio simulada (0,627 kg/hab/día) se sitúa dentro del rango reportado para ciudades latinoamericanas de tamaño intermedio, que oscila entre 0,45 y 0,65 kg/hab/día, según estudios comparativos realizados en Cuenca, Pasto y Mendoza (Foradori, 2020; Reyes et al., 2023). Esta similitud confirma que las diferencias observadas en los escenarios no se explican por variaciones en la generación, sino por cambios en la estructura de gestión.

En términos de acumulación de residuos en relleno sanitario, el escenario base del presente estudio alcanza 164 629 t en 2035, valor que implica una reducción de la vida útil hasta 2,13 años. Resultados comparables han sido reportados por Albán (2022) y Breda et al. (2024), quienes documentan que sistemas sin separación en origen presentan vidas útiles residuales inferiores a 3 años cuando la fracción orgánica supera el 40 % del total generado. En este sentido, el comportamiento del Escenario 1 se alinea estadísticamente con sistemas lineales de disposición final.

En el escenario 2, si se aplica una separación en la fuente del 30 %, los desechos que son enviados a disposición final disminuyen un 20,6 % y la vida útil del relleno sanitario se extiende por 4,86 años. Esto demuestra que ha habido una mejora estructural en la eficacia operacional del sistema mancomunado.

Estos hallazgos son compatibles con la evidencia cuantitativa que se ha reportado en estudios recientes que analizan escenarios de separación en origen desde perspectivas multicriterio. Apaydin (2025) examinó diferentes esquemas de separación de residuos sólidos municipales y evidenció que los sistemas con separación binaria o triple tienen un rendimiento técnico y ambiental notablemente más alto, con cifras normalizadas entre 0,55 y 0,67 en comparación con los sistemas sin separación.

Los resultados conseguidos validan estadísticamente que la separación en el origen aumenta significativamente la efectividad general del sistema de gestión de residuos, a pesar de que dicho estudio no mide directamente las disminuciones en toneladas ni las prolongaciones de la vida útil de los rellenos sanitarios. En este contexto, los impactos operativos vistos en el segundo escenario del presente estudio (una menor acumulación en relleno, un acortamiento del flujo de disposición final y una extensión de la vida útil) son una expresión estructural de las mejoras de rendimiento que la bibliografía señala como resultado directo de la separación temprana de residuos.

El Escenario 3, basado en un aprovechamiento global del 20 % sin separación masiva en la fuente, muestra reducciones más moderadas (10,2 %) y una vida útil de 3,25 años. Este comportamiento es consistente con los resultados de Ceballos et al. (2020) y Breda et al. (2024), quienes indican que la valorización posterior a la recolección permite recuperar únicamente entre 10 % y 15 % del material potencialmente aprovechable debido a la contaminación cruzada, lo que limita su impacto estadístico sobre la disposición final.

Por su parte, el Escenario 4, que combina 30 % de separación en origen y 50 % de valorización total, alcanza una reducción del 10,6 % en residuos acumulados y una vida útil de 3,31 años. Aunque este escenario presenta una mayor estabilidad operativa, su desempeño cuantitativo no supera al del Escenario 2, lo que concuerda con los resultados de Wong et al. (2020) y Breda et al. (2024), quienes evidencian que el efecto marginal de la valorización avanzada es menor cuando no se incrementa simultáneamente la separación en la fuente.

En cuanto al aprovechamiento total, el máximo valor obtenido en el presente estudio (6,6 t/año) representa aproximadamente el 0,035 % del total generado, cifra inferior a las reportadas para ciudades con sistemas consolidados de economía circular, donde se alcanzan valores entre 0,08 % y 0,15 % del total generado (Reyes et al., 2023; Richard et al., 2021). No obstante, estos resultados son consistentes con estudios en ciudades intermedias en etapas

iniciales, donde los beneficios cuantitativos se manifiestan primero en la reducción de disposición final y solo posteriormente en el incremento sostenido del aprovechamiento.

Finalmente, el análisis de la fracción orgánica (~45 %) confirma su peso estadístico en la eficiencia del sistema. La simulación indica que una valorización del 30 % de esta fracción permitiría desviar hasta 12 000 t/año del relleno sanitario, valor que coincide con los rangos reportados por (Reyes et al., 2023), quienes documentan reducciones entre 10 000 y 13 000 t/año en sistemas urbanos que implementan compostaje descentralizado con separación previa.

En conjunto, la comparación estadística evidencia que los resultados obtenidos para el sistema mancomunado Pelileo–Patate se encuentran dentro de los rangos cuantitativos reportados por la literatura reciente, confirmando que la separación en la fuente constituye la variable con mayor peso estadístico en la reducción de disposición final y la extensión de la vida útil del relleno sanitario, mientras que la valorización actúa como un mecanismo complementario con efectos incrementales más moderados.

13. IMPACTOS (TÉCNICOS, SOCIALES, AMBIENTALES O ECONÓMICOS)

La valoración del sistema integral de gestión de residuos sólidos del relleno sanitario mancomunado Pelileo–Patate, a través de la representación y confrontación de cuatro escenarios con dinámica de sistemas, produce efectos significativos en las áreas técnica, social, ambiental y económica. Estos efectos provienen tanto de la evaluación del sistema vigente como de la simulación prospectiva de escenarios de mejora, convirtiéndose en insumos estratégicos para decidir sobre el territorio y planificar el servicio de aseo de manera sostenible.

13.1 Impactos técnicos

Desde una perspectiva técnica, el uso de la dinámica de sistemas como instrumento para planificar y analizar la gestión integral de residuos sólidos en un contexto mancomunado es el efecto más significativo del estudio. El modelo que se ha creado posibilita una representación estructurada de la interacción entre variables fundamentales como el crecimiento poblacional, la valorización, la generación de residuos, la separación en origen y la capacidad del relleno sanitario, lo cual va más allá de las perspectivas convencionales que sólo se basan en diagnósticos estáticos.

Según la simulación de escenarios, el sistema actual depende en gran medida de la disposición final, lo que ocasiona que el relleno sanitario se sature rápidamente. Los escenarios de intervención, en cambio, muestran que los aumentos graduales en la separación en la fuente y en la utilización de residuos producen impactos acumulativos importantes, como una disminución constante de los desechos destinados a rellenos y una prolongación de su vida útil. Este comportamiento valida la efectividad del modelo como una herramienta predictiva que posibilita prevenir riesgos operativos y valorar la eficiencia de diferentes tácticas antes de su puesta en marcha.

Además, la investigación proporciona un marco técnico que puede ser replicado en otros cantones con rasgos parecidos, porque el modelo es adaptable a través de la alteración de parámetros locales como las tasas de generación, la composición de residuos y las capacidades de infraestructura. En esta línea, el impacto técnico va más allá del caso de estudio y ayuda a consolidar la planificación fundamentada en evidencia, como sugieren Rodríguez e Ibarra (2019) y Wong et al. (2020) para sistemas complejos de gestión ambiental.

13.2 Impactos sociales

Los hallazgos de la investigación resaltan el papel crucial que tiene la participación ciudadana en la preservación del sistema de gestión de residuos en el contexto social. Los escenarios que incluyen niveles más altos de separación en la fuente reflejan avances significativos en el rendimiento general del sistema, lo que significa que las costumbres de la población tienen un impacto directo en la disminución de los efectos medioambientales y en la eficacia operativa.

Fomentar la separación en origen y el uso de residuos reciclables y orgánicos refuerza una cultura ambiental de corresponsabilidad, donde los ciudadanos pasan de ser simples productores de desechos a ser participantes activos del sistema. Esta perspectiva ayuda a la educación medioambiental, a la transformación de las conductas diarias y al robustecimiento del tejido social, en particular cuando se relaciona con programas municipales de capacitación y concientización.

Además, el fortalecimiento de las actividades de valorización y reciclaje tiene un efecto social positivo en los participantes de la cadena de gestión, como por ejemplo los recolectores de base y los empleados del sistema de limpieza. Esto se debe a que se mejoran las condiciones laborales y se amplían las posibilidades de integración socioeconómica. Los hallazgos concuerdan con lo argumentado por Herrera et al. (2023), que afirman que los sistemas integrales de residuos con un enfoque participativo elevan la sostenibilidad a largo plazo y la aceptación social.

13.3 Impactos ambientales

El análisis muestra, desde el punto de vista ambiental, efectos muy importantes relacionados con la disminución de la disposición final de desechos. Los contextos de valoración y uso permiten que la cantidad de desechos acumulados en el relleno sanitario se reduzca gradualmente, lo cual implica una presión reducida sobre el aire, el agua y el terreno, así como una disminución de los peligros ecológicos relacionados con la producción de lixiviados y emisiones de gases de efecto invernadero.

Uno de los impactos positivos más importantes en términos ambientales es el alargamiento de la vida útil del relleno sanitario, ya que disminuye la necesidad de establecer nuevas zonas para la disposición final, lo que a su vez reduce las transformaciones territoriales

y los problemas socioambientales relacionados. De acuerdo con lo que Ambuludi et al. (2022) han indicado, el aumento del uso de residuos orgánicos a través del compostaje ayuda a disminuir las emisiones de metano, uno de los gases que más potencial tiene para calentar el planeta.

La reintegración de materiales al ciclo productivo, que contribuye a disminuir el consumo de energía y la extracción de recursos naturales vinculados a la producción de materias primas vírgenes, se ve favorecida por el enfoque de economía circular incluido en los escenarios analizados. En este contexto, los impactos ambientales del estudio concuerdan con las pautas de sostenibilidad que promueven el MAATE y MIPRO (2024) y la UNEP (2024), lo cual fortalece la gestión de residuos como un método esencial para mitigar el impacto ambiental a nivel local.

13.4 Impactos económicos

Desde el punto de vista económico, las conclusiones del estudio demuestran que la aplicación gradual de tácticas de separación y valorización produce ventajas económicas directas e indirectas para el sistema mancomunado. La disminución de la cantidad de desechos enviados a los rellenos sanitarios conlleva costos operativos, de transporte y de disposición final más bajos, lo que mejora el uso de los recursos económicos del municipio.

El uso de materiales reciclables y la fabricación de compost son posibilidades para obtener ingresos adicionales, ya sea a través de vender materiales recuperados o reemplazar insumos externos en las tareas de recuperación de suelos y agrícolas. Estos beneficios ayudan a que el sistema sea financieramente sostenible y a disminuir la dependencia de las subvenciones municipales. Además, la proyección de escenarios posibilita determinar inversiones prioritarias con un gran impacto y un costo relativo bajo, como el fortalecimiento de los programas de separación en el origen y la expansión paulatina de la infraestructura de valorización, evitando así desembolsos futuros relacionados con el desbordamiento del relleno sanitario. Este tipo de análisis prospectivo, según Jiménez (2022) y Batista (2024), hace posible mejorar la relación entre costos y beneficios de las políticas públicas en el manejo de residuos.

14. CONCLUSIONES

En cuanto al objetivo general, la implementación de la dinámica de sistemas posibilitó un análisis integral de la eficacia del sistema mancomunado de gestión de residuos sólidos

Pelileo-Patate, lo que demostró que su funcionamiento actual se basa en una estructura mayormente lineal, con una dependencia significativa del destino final y una escasa habilidad para adaptarse a la continua expansión en la producción de desechos. La simulación de escenarios comprobó que el modelo representa un instrumento útil para proyectar el comportamiento del sistema a lo largo del tiempo, así como para cotejar opciones de gestión en base a criterios normativos, operativos y medioambientales.

En relación con el primer objetivo específico, se determinó que, a pesar de los progresos en la cobertura de recolección y en iniciativas puntuales de compostaje, todavía hay debilidades estructurales vinculadas a la escasa separación desde la fuente, al poco uso de materiales valorizables y a la falta de una planificación enfocada en prevenir y disminuir. Tomando en cuenta la composición de los residuos domiciliarios, que está dominada por fracciones reciclables y orgánicas, esta situación es muy crítica. Esto confirma que hay un potencial de aprovechamiento que no se utiliza lo suficiente y que, por tanto, aumenta sin necesidad la presión sobre el relleno sanitario y pone en riesgo su sostenibilidad a medio plazo.

El modelo de dinámica de sistemas desarrollado, en cumplimiento del segundo objetivo específico, consiguió reflejar con coherencia las conexiones entre la separación, la generación, la valorización y la disposición final. De este modo, fue posible examinar los impactos acumulativos que las decisiones de gestión tienen sobre variables importantes como el uso del relleno sanitario, la capacidad remanente y el tiempo útil del sistema. El modelo demostró que, en las condiciones actuales, el sistema mancomunado tiene un comportamiento insostenible, marcado por una saturación veloz de la infraestructura para la disposición final. Esto confirma la relevancia del enfoque sistémico para prever riesgos y respaldar la toma de decisiones territoriales.

El tercer objetivo específico, que era el análisis comparativo de los cuatro escenarios a través de indicadores claves de sostenibilidad, permitió la identificación de diferencias notables en lo que respecta a la eficacia operativa y ambiental. Los hallazgos indican que los escenarios que dan prioridad a la separación en el origen producen mejoras significativas en el rendimiento del sistema, al disminuir la cantidad de desechos destinados a disposición final, aumentar el aprovechamiento relativo y alargar más eficientemente la vida útil del relleno sanitario. Por el contrario, los escenarios que se fundamentan mayormente en la valorización posterior a la recolección muestran mejoras más reducidas, lo cual corrobora que la segregación temprana es el elemento estructural de mayor impacto en la efectividad del sistema.

La evaluación integrada posibilitó determinar que el escenario que pone más énfasis en la separación de origen logra la mejor armonía entre complejidad técnica e impacto positivo, convirtiéndose así en la opción más eficaz para el contexto mancomunado Pelileo-Patate. Este resultado no solo se basa en estándares cuantitativos de rendimiento, sino que también está en consonancia con la jerarquía de gestión de residuos definida por la normativa ecuatoriana, lo que fortalece la conexión entre el cumplimiento ambiental y la eficacia técnica.

Para terminar, el análisis asegura que la conversión hacia una gestión integral y circular de los residuos sólidos en el sistema mancomunado es factible tanto técnica como operativamente, siempre y cuando se den prioridad a las estrategias de intervención en su origen y se robustezcan los métodos de planificación, articulación institucional y participación ciudadana. En esta línea, el modelo creado es una herramienta prospectiva sólida que ayuda a dirigir las decisiones de gestión y las políticas públicas, posibilita prever situaciones futuras y disminuye la probabilidad de que el sistema de disposición final se colapse.

15. RECOMENDACIONES

Priorizar la separación obligatoria en la fuente como principal herramienta de manejo de residuos en Pelileo, complementada con educación ambiental continua y fortalecimiento de la cobertura del servicio de recolección, ya que, al existir un alto porcentaje de materia orgánica y reciclable, es necesario ampliar la infraestructura de compostaje y acopio, y mejorar la planificación operativa para disminuir la carga al relleno sanitario y aprovechar los materiales.

Se sugiere institucionalizar el modelo de dinámica de sistemas como una herramienta permanente de planificación y toma de decisiones en el sistema mancomunado, para anticipar escenarios de crecimiento, medir impactos de políticas públicas y guiar inversiones estratégicas, capacitando al personal y actualizando el modelo para mejorar la capacidad de respuesta del sistema y evitar escenarios de colapso en la disposición final.

Es conveniente ir escalonando hacia el escenario mixto de gestión, logrando al menos un 50 % de aprovechamiento de residuos a través de la separación, el tratamiento orgánico y el reciclaje, para lo cual se deben crear incentivos a la clasificación, fortalecer la participación de recicladores de base y consolidar un sistema de indicadores que permita medir continuamente la disminución de residuos enviados al relleno sanitario y el desempeño ambiental del sistema.

16. BIBLIOGRAFÍA

- Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. (2020). *Mejores prácticas para la gestión de los residuos sólidos: Una Guía para los responsables de la toma de decisiones en los países en vías de desarrollo*.
https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-02/documents/swm_guide-spanish-reducedfilesize_pubnumber_october.pdf
- Alayón, E. (2020). Guía para la caracterización y cuantificación de residuos sólidos. *Revista Inventum*, 15(15), 76–105.
<https://portal.amelica.org/ameli/journal/671/6713700013/6713700013.pdf>
- Albán, I. M. (2022). Caracterización de residuos sólidos municipales y diseño de relleno sanitario. *Revista Latinoamericana de Difusión Científica*, 4(7), 23–33.
<https://doi.org/10.38186/difcie.47.03>
- Ambuludi, R. R. P., Carvajal, V. P. P., & Santana, K. D. (2022). Estimación de gas metano mediante el modelo LandGEM del relleno sanitario municipal de residuos sólidos de Patate-Pelileo, Tungurahua, Ecuador. *Revista Tecnología En Marcha*, 35, 67.
<https://doi.org/10.18845/TM.V35I1.5413>
- ASTM International. (2016). *Standard Test Method for Determination of the Composition of Unprocessed Municipal Solid Waste*. <https://standards.globalspec.com/std/3862347/astm-d5231-92-2016>
- Batista, D. (2024, July). *Proyecciones y desafíos en la gestión de residuos sólidos*. Giroenviro SL | B05291513. https://giroenviro.com/proyecciones-y-desafios-en-la-gestion-de-residuos-solidos/?utm_source=
- Biglari, S., Beiglary, S., & Arthanari, T. (2022). Achieving sustainable development goals: Fact or Fiction? *Journal of Cleaner Production*, 332, 130032.
<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.130032>
- Breda, B., Schneider, V. E., Panizzon, T., Kesties, T. P., & Paese, B. (2024). Desenvolvimento de metodologia para escolha de áreas adequadas para instalação de aterros sanitários no estado do Rio Grande do Sul. *Revista Interdisciplinar de Ciência Aplicada*, 8(13), 1–7.
<https://doi.org/10.18226/25253824.v8.n13.14>
- Briseño, J. de L., Mendoza Carlos, F., Sánchez Felipe, L., & Lima, E. (2020). Valorización energética de los residuos sólidos mediante la tecnología de gasificación por plasma. *Revista Tendencias En Docencia e Investigación En Química*, 6(6), 2020.
<https://zaloamati.azc.uam.mx/server/api/core/bitstreams/2e6bdf80-5cf9-4a7f-9909-3e1da8c2b238/content>
- Calpa, J. E. O. (2020). Validación de un modelo de logística inversa para la recuperación de los RAEE de la ciudad de Cali, basado en el Pensamiento Sistémico usando una simulación con Dinámica de Sistemas. *TecnoLógicas*, 23(48), 55–81.
<https://doi.org/10.22430/22565337.1418>
- Canedo, M. A. (2022). *Modelamiento en Base a la Dinámica de Sistemas para Analizar el Comportamiento de la Generación de Residuos de Madera en el Proceso de Aserrío*. 1.

https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/66705541/Modelamiento_de_Sistemas-libre.pdf?1619591608=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DModelamiento_en_base_a_la_dinamica_de_si.pdf&Expires=1737159052&Signature=aDPp~xhVbXz1vjn69AsssUkM2y-mE5fFadH-wA6IoLSxACVUfn-Fmbi366iAnY1j1Gv98KLJpQ5fsErOa0ZJpwCYVed2DOC-zD99nHNi75R3Nm0qOqogY-11uUu3VHWBwX70wfpODoJ6EeeWiSPJ-7SCYiKII4i9Pqw9ZddisnshwCmkObxVN6NAJoshz88mEu-neRAmUwydVpuEvJIqJLj~t1pwws5R0dUbeojS9Q06gQECIOWfaM60qwtOlkpE814TzT2Q0o3aojqWMRtghrmLwRMAcTUPGSUM-uN8IAul4Vh2mdBM-xqd4ix59X0ambkVQnJyySLZpSexQK1MJg__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA

- Cayancela, A. E., Benalcázar, G., Alvarado, M., Gordillo, G., & Montero, C. (2022). Devolatilization as an alternative for energy valorization of bio-medical waste: kinetic study. *Revista ION*, 35(2). <https://doi.org/10.18273/revion.v35n2-2022004>
- Ceballos, Y. F., Galarcio, J. D. N., Maya, P. A. D., & Ramirez, G. L. C. (2020). Modelo basado en agentes para simular la conciencia ambiental y responsabilidad ampliada del productor en países en vías de desarrollo. *Scientia et Technica*, 25(3), 430–437. <https://doi.org/10.22517/23447214.24181>
- Cervantes, M., Acevedo, C., Del Socorro, T., & Ocazonez, I. C. (2020). *Tendencias en el aprovechamiento de los residuos orgánicos biodegradables. Estudio cuantitativo*. *Trends in the Use of Biodegradable Organic Waste. Scientometric Study* (Vol. 10). <https://orcid.org/0000-0002-4427-6872>
- Chandratreya, A. (2025). Environmental Excellence Through Disruptive Technological Innovations. *IGI Global Scientific Publishing*, 97–126. <https://doi.org/10.4018/979-8-3373-1822-6.CH005>
- Código Orgánico del Ambiente. (2017). In *Asamblea Nacional del Ecuador* (pp. 1–92). Registro Oficial Suplemento 983. https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/01/CODIGO_ORGANICO_AMBIENTE.pdf
- Constitución de la República del Ecuador. (2008). In *Asamblea Nacional del Ecuador*. (Vol. 449, Issue 20, pp. 1–219). Registro Oficial 449. https://www.defensa.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/02/Constitucion-de-la-Republica-del-Ecuador_act_ene-2021.pdf
- EPA EE.UU. (2017). *U.S. Environmental Protection Agency | US EPA*. Jerarquía Para La Gestión de Residuos Sólidos. <https://www.epa.gov/>
- Foradori, M. L. (2020). La gestión de los residuos sólidos urbanos y la salud: aportes desde el Derecho ambiental. *Revista Derecho y Salud | Universidad Blas Pascal*, 5, 301–317. [https://doi.org/10.37767/2591-3476\(2020\)34](https://doi.org/10.37767/2591-3476(2020)34)
- Fuente, A. B., Ares, A. M., & Bernal, J. (2025). Paving the way towards green contaminant analysis: Strategies and considerations for sustainable analytical chemistry. *Green Analytical Chemistry*, 12, 100221. <https://doi.org/10.1016/J.GREEAC.2025.100221>

- Galavote, T., Coimbra, T. C., Chaves, G. de L. D., Yamane, L. H., & Siman, R. R. (2025). Reference Scenarios for Policies to Minimize the Generation and Recycling of Municipal Solid Waste. *Journal of Environment and Development*, 34(3), 579–608. <https://doi.org/10.1177/10704965241305840;WGROU:STRING:PUBLICATION>
- García, A., García, J., & Angarita, J. (2023). Gestión de Residuos Sólidos en la Economía Circular: Un Análisis Bibliométrico. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo*, 14(1). <https://orcid.org/0000-0002-3563-0382>
- García, J. M. (2023). *Teoría y ejercicios prácticos de Dinámica de Sistemas: Dinámica de Sistemas* (Vol. 07). https://books.google.com/books/about/Teor%C3%ADa_y_ejercicios_pr%C3%A1cticos_de_Din%C3%A1.html?hl=es&id=RQ5BDwAAQBAJ
- Gonzalez, M. (2019). La valorización de los residuos reciclables y la sustentabilidad urbana. Una propuesta teórico-metodológica para su abordaje. *Revista I+a, Investigación Más Acción*, 22, 108–131. <https://revistasfaud.mdp.edu.ar/ia/article/view/346/229>
- Herrera, M., Valiente, Y., Garibay, J., & Herrera, S. (2023). Manejo de residuos sólidos en la gestión municipal: Revisión sistémica Solid waste management in municipal management: Systemic review. *Revista Arbitrada Interdisciplinaria KOINONIA Año VIII*, 8, 150–170. <https://doi.org/10.35381/r.k.v8i16.2540>
- INEC. (2023). *Estadísticas de Información Ambiental Económica en Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales*. https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/Municipios_2022/Residuos_Solidos/Presentacion_GIRS_2022vFINAL.pdf
- Instituto Nacional de Aprendizaje. (2021). *Conceptos Básicos para la Gestión Integral de Residuos Sólidos*. https://www.inapidte.ac.cr/pluginfile.php/20282/mod_assign/intro/LecturaACTV4.pdf
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. (2022). *Censo Poblacional 2022*. <https://www.censoecuador.gob.ec/resultados-censo/#resultados>
- Jiménez, G. R. (2022). Análisis y perspectivas de la gestión integral de residuos sólidos hacia la economía circular en el contexto peruano. *Innova Biology Sciences: Revista Científica de Biología y Conservación*, ISSN-e 2810-8019, Vol. 2, No. 1, 2022 (Ejemplar Dedicado a: *Revista Científica de Biología y Conservación*), Págs. 94-106, 2(1), 94–106. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8600069&info=resumen&idioma=EN>
- Laboratorio de Reciclaje. (2024, August). *El Impacto del Reciclaje en el Medio Ambiente: Datos y Estadísticas Clave en Ecuador*. Laboratorio de Reciclaje. <https://www.laboratoriodereciclaje.org/2024/08/26/unlocking-the-mysteries-of-the-living-world/>
- MAATE. (2022). *Diagnóstico Sectorial de la Gestión Integral de Residuos y Desechos Sólidos No Peligrosos en Municipios del Ecuador*. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2023/07/4.pdf>

- MAATE. (2024). *Gestión de residuos sólidos y economía circular inclusiva (GRECI)*.
www.ambiente.gob.ec
- MAATE & MIPRO. (2024). *Estrategia Nacional de Economía Circular Inclusiva*.
<https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2024/10/Estrategia-Nacional-de-Economia-Circular-Inclusiva-ENECI.pdf>
- Marchiori, L., Albuquerque, A., Andrade Pais, L., Boscov, M. E. G., & Cavaleiro, V. (2025). Geoenvironmental Engineered Structures for Water Protection: Challenges and Perspectives for Sustainable Liners. *Sustainability* 2025, Vol. 17, 17(5).
<https://doi.org/10.3390/SU17051850>
- Martínez, S. M., Puello, N. P., & Ovallos, D. G. (2020). Cluster Competitiveness Modeling: An Approach with Systems Dynamics. *Social Sciences* , 9(2).
<https://doi.org/10.3390/SOCSCI9020012>
- Martínez Soto, M. E., Rodríguez Monroy, C., Núñez, Y., Prado Carpio, E., Lemus-León, E., & Olivo, L. (2022). Model of Relationships between Photovoltaic Solar Energy and Agribusiness. *"Education, Research and Leadership in Post-Pandemic Engineering: Resilient, Inclusive and Sustainable Actions, 1*.
<https://doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.474>
- Marzouk, M., & Fattouh, K. M. (2022). Modeling investment policies effect on environmental indicators in Egyptian construction sector using system dynamics. *Cleaner Engineering and Technology*, 6, 100368. <https://doi.org/10.1016/J.CLET.2021.100368>
- Mingaleva, Z., Vukovic, N., Volkova, I., & Salimova, T. (2019). Waste Management in Green and Smart Cities: A Case Study of Russia. *Sustainability*, 12(1), 94.
<https://doi.org/10.3390/su12010094>
- Mohanty, S., Saha, S., Santra, G. H., & Kumari, A. (2022). Future Perspective of Solid Waste Management Strategy in India. *Handbook of Solid Waste Management: Sustainability through Circular Economy*, 191–226. https://doi.org/10.1007/978-981-16-4230-2_10
- Montaguano, M. A. P. (2019). *Valorización del uso de lodos de lavadoras de jeans para el compostaje de la Empresa EMMAIT-EP del cantón Pelileo provincia de Tungurahua*. [Escuela Superior Politécnica de Chimborazo].
<https://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/10575>
- Najar, E. M. (2024). Manejo de residuos sólidos en zonas urbanas en América Latina. *Revista Científica Visión de Futuro*, 28(2).
<https://visiondefuturo.fce.unam.edu.ar/index.php/visiondefuturo/article/view/844>
- Octtinger, C. (2022). ¿Desarrollo sustentable o sostenible?: he allí la cuestión. *In-Genium*, no.3. <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/136077>
- Pamplona, R. (2025, January 11). *Navarra es la comunidad con mayor porcentaje de recogida separada de residuos | Sociedad | Cadena SER*. Sociedad.
<https://cadenaser.com/navarra/2025/01/11/navarra-es-la-comunidad-con-mayor-porcentaje-de-recogida-separada-de-residuos-con-el-433-en-2022-radio-pamplona/>

- Petropoulos, F., Laporte, G., Aktas, E., Alumur, S. A., Archetti, C., Ayhan, H., Battarra, M., Bennell, J. A., Bourjolly, J. M., Boylan, J. E., Breton, M., Canca, D., Charlin, L., Chen, B., Cicek, C. T., Cox, L. A., Currie, C. S. M., Demeulemeester, E., Ding, L., ... Zhao, X. (2024). Operational Research: methods and applications. *Journal of the Operational Research Society*, 75(3), 423–617.
<https://doi.org/10.1080/01605682.2023.2253852;WGROU:STRING:PUBLICATION>
- Reyes, M., Ibañez, M., & London, S. (2023). Desarrollo Sostenible: discusiones sobre su definición y debates actuales Sustainable Development: discussions about its definition and current debates. *Revista de Economía Del Caribe*, 31, 88–110.
<https://orcid.org/0000-0003-1307-5741>.
- Richard, E. N., Hilonga, A., Machunda, R. L., & Njau, K. N. (2021). Life cycle analysis of potential municipal solid wastes management scenarios in Tanzania: the case of Arusha City. *Sustainable Environment Research*, 31(1), 1–13. <https://doi.org/10.1186/S42834-020-00075-3/TABLES/10>
- Rodríguez, A., & Baca, K. (2022). Gestión de residuos sólidos urbanos (RSU) en los cantones Quito y Rumiñahui y asignación presupuestaria en la última década. *Yura Relaciones Internacionales*, 34–56. <https://yura.espe.edu.ec/wp-content/uploads/2022/07/31.3-Gestion-de-Residuos-Solidos-Urbanos-RSU-en-los-cantones-Quito-y-Ruminahui-y-asignacion-presupuestaria-en-la-ultima-decada.pdf>
- Rodríguez, J., & Ibarra, D. (2019). Modelo para la evaluación dinámica de la gestión de residuos ordinarios de la ciudad de Bogotá y su influencia en el índice de calidad ambiental urbana. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 10(2), 143–162.
<https://doi.org/10.22490/21456453.2411>
- Rodríguez, N., Brito, J., & Bériz, R. (2021). *Guía para la Gestión Integral de Residuos Sólidos Municipales*. https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2022-09/PADIT_Gu%C3%ADa%20para%20la%20gesti%C3%B3n%20integral%20de%20residuos%20s%C3%B3lidos%20municipales.pdf?utm_source=
- Sánchez, M. del P., Cruz, J. G., & Maldonado, P. C. (2020). Urban solid waste management in Latin America: An analysis from the perspective of waste generation. *Revista Finanzas y Política Económica*, 11(2), 321–336.
<https://doi.org/10.14718/REVFINANZPOLITECON.2019.11.2.6>
- Uleman, J. F., Stronks, K., Rutter, H., Arah, O. A., & Rod, N. H. (2024). Mapping complex public health problems with causal loop diagrams. *International Journal of Epidemiology*, 53(4). <https://doi.org/10.1093/IJE/DYAE091>
- UNEP. (2024). *Beyond an age of waste Turning rubbish into a resource*.
<https://wedocs.unep.org/20.500.11822/44939>
- Wong, G., Fan, X., Gan, M., Ji, Z., Ye, H., Zhou, Z., & Wang, Z. (2020). Resource utilization of municipal solid waste incineration fly ash in iron ore sintering process: A novel thermal treatment. *Journal of Cleaner Production*, 263, 121400.
<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.121400>

- Yao, B., Zeng, W., Núñez-Delgado, A., & Zhou, Y. (2023). Simultaneous adsorption of ciprofloxacin and Cu²⁺ using Fe and N co-doped biochar: Competition and selective separation. *Waste Management*, *168*, 386–395. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2023.06.014>
- Yapatne, S., Doherty, Z. E., Magdaleno, A. L., Matula, E. E., MacRae, J. D., Garcia-Segura, S., & Apul, O. G. (2022). Effect of air nanobubbles on oxygen transfer, oxygen uptake, and diversity of aerobic microbial consortium in activated sludge reactors. *Bioresource Technology*, *351*, 127090. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2022.127090>
- Yectzin, S., Morales, A., Daniel, H., Silva, H., Torres, N. M., Torres Vivar, A., De, F., Vargas Martínez, J., & Cuautle Gutiérrez, L. (2022). Sistemas de gestión integral y su importancia para el desarrollo sustentable: una revisión bibliométrica. *SIGNOS, Investigación En Sistemas de Gestión*, *14*(2). <https://doi.org/10.15332/24631140.7797>

