



---

**Universidad de Valladolid**

## **PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL**

**TESIS DOCTORAL:**

**Emisiones de biogás producidas en los rellenos  
sanitarios del Ecuador: estimación de los  
beneficios económicos totales de la producción  
de biogás**

Presentada por **María Paulina Poma Copa** para optar al  
grado de  
Doctora por la Universidad de Valladolid

Dirigida por:

**Dr. Theofilos Toulkeridis**

## **Dedicatoria**

A mi madre, María Juana Copa Vimos, que ya no está físicamente, pero sus valores y enseñanzas están siempre presentes en mi vida.

A mi esposo, Marco Usca, por su apoyo incondicional, y a mis hijas Alysson y Karlita, por su comprensión y por brindarme siempre la fuerza y el optimismo para continuar.

## **Agradecimiento**

Al profesor Theofilos Toulkeridis, por todo su apoyo en el camino del conocimiento. A los gobiernos municipales de los cantones Santa Cruz, Cuenca, Guayaquil, Francisco de Orellana y Loreto, que me abrieron las puertas para realizar el trabajo de campo; en especial, al Gobierno Municipal del cantón Loreto y al Gobierno Municipal del cantón Francisco de Orellana, por confiar en nuestro conocimiento y permitir la realización de los estudios de gestión integral de los residuos sólidos y del diseño del Complejo Ambiental para la gestión de residuos sólidos del cantón Loreto. A todos aquellos que me acompañaron y que siempre me ayudaron a resolver las dudas que se presentaron en el camino.

## **RESUMEN**

El servicio público de gestión integral de residuos sólidos urbanos (GIRS) constituye un desafío crítico para los gobiernos municipales, especialmente en las fases de recolección, transporte y disposición final, donde la gestión inadecuada genera impactos ambientales y conflictos socioambientales en el área de influencia directa. La descomposición anaerobia de residuos orgánicos genera emisiones de biogás, lixiviados y olores desagradables que afectan la calidad del aire y contribuyen alrededor del 20 % al cambio climático. El metano ( $\text{CH}_4$ ), se encuentra en mayor proporción, posee alto potencial energético para generación eléctrica. Su aprovechamiento depende de factores climáticos, composición, volumen de residuos y cantidad de biogás generado, siendo decisivo que el metano supere el 50 % para implementar sistemas de captación y conducción de biogás.

El objetivo de este estudio fue estimar las emisiones de biogás en rellenos sanitarios de distintas categorías y evaluar los beneficios económicos derivados de su producción mediante análisis de calidad del aire y olores, caracterización de residuos, evaluación de aspectos técnicos, ambientales, económicos, sociales y legales, y estimación de biogás mediante el modelo LandGEM versión 3.03, con el fin de determinar la factibilidad técnica y económica de implementar sistemas de captación para generar energía eléctrica y reducir emisiones en la fase de disposición final de los residuos.

La metodología incluyó monitoreo de calidad del aire y olores en los cantones Loreto y Francisco de Orellana, evaluando  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{C}_6\text{H}_6$ , Cd, Hg y  $\text{H}_2\text{S}$  en un radio de 500 m. Se caracterizaron los residuos generados y recolectados, determinando porcentajes de fracciones orgánicas, reciclables y no aprovechables. La evaluación del GIRS consideró aspectos técnico, ambiental, económico, social y legal, identificando no conformidades mayores (NC+). La estimación de biogás se realizó para los rellenos sanitarios Pichacay (Cuenca) y Las Iguanas (Guayaquil), proyectando producción de metano y energía eléctrica durante la vida útil del relleno. Para cantones sin infraestructura se diseñó un modelo de gestión y un modelo tarifario basado en consumo eléctrico, evaluando indicadores como Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR).

Los resultados indicaron que los parámetros de calidad del aire se mantienen dentro de los límites normativos, mientras que la concentración de  $\text{H}_2\text{S}$  evidenció percepción leve de olor. El cantón Francisco de Orellana en el 2022 generó 82,08 ton/día, recolectando 73,11 ton/día, con 58 % orgánicos; 22 % reciclables y 20 % no aprovechables. El cantón Loreto

en el 2023 generó 19,39 ton/día, recolectando 13,15 ton/día, con 63 % orgánicos; 24 % reciclables y 13 % no aprovechables. Otros cantones mostraron disposición de 559 (ton/día) en Cuenca y 4.400 ton/día en Guayaquil. La estimación de biogás proyectó para Pichacay un volumen máximo de 76.982,177 m<sup>3</sup>/año en 2021, con CH<sub>4</sub> de 41.007,519 m<sup>3</sup>/año y generación de 24.313.579,99 kWh/año, suficiente para abastecer 1.522 hogares. En Las Iguanas, el volumen máximo fue 693.975,228 m<sup>3</sup>/año, con CH<sub>4</sub> de 402.505,632 m<sup>3</sup>/año, produciendo 229.272.368,53 kWh/año, abasteciendo 15.140 hogares. El modelo tarifario permitió calcular valores de cobro según consumo eléctrico, obteniéndose para un consumo 0 kWh un valor \$0,28; 25 kWh un valor \$1,00; 100 kWh un valor \$2,92; 1300 kWh un valor \$4,5; 300 kWh un valor \$5,68 y 700 kWh un valor de \$9,83, un VAN de \$688.495,13 y TIR de 9,61 %, evidenciando viabilidad financiera para la implementación de los modelos de gestión y tarifario.

Se concluye que la implementación de sistemas de captación de biogás requiere considerar factores climáticos, composición, volumen de residuos y cantidad de biogás generado. De los seis cantones analizados, dos presentan condiciones para aprovechamiento energético: Pichacay ya cuenta con sistema de captación y Las Iguanas se encuentra en fase de implementación. Los cantones Loreto, Francisco de Orellana y Aguarico, al carecer de rellenos sanitarios y presentar bajos volúmenes de residuos, requieren modelos de gestión basados en reciclaje, tratamiento de orgánicos e inclusión de recicladores bajo enfoque de economía circular. El relleno sanitario de Santa Cruz requiere actualización de su modelo de gestión. Se recomienda que futuras investigaciones evalúen la recuperación de biogás generado en plantas de tratamiento de lixiviados para optimizar la mitigación de emisiones y el aprovechamiento energético.

**Palabras claves:** Biogás, metano, modelo tarifario, relleno sanitario, botadero.

## **ABSTRACT**

The public service of integrated management of urban solid waste (GIRS) is a challenge for municipal governments, especially in the phases of collection, transportation, and final disposal, where inadequate management generates socio-environmental impacts in the area of direct influence. The anaerobic decomposition of organic waste generates biogas emissions, leachate, and unpleasant odors that affect air quality and contributes around 20% to climate change. A high methane ( $\text{CH}_4$ ) amount has the ability to produce electricity. the amount of biogas produced, composition, climate, all affect its use; biogas capture and conduction systems require a methane content of at least 50%.

The objective was to estimate biogas emissions in landfills of different categories and evaluate the economic benefits derived from its production thru air quality and odors, waste characterization, assessment of technical, environmental, economic, social and legal aspects, and biogas estimation using the LandGEM version 3.03 model, in order to determine the technical and economical feasibility of implementing collection systems to generate electricity and reduce emissions in disposal phase of waste.

The methodology included monitoring air quality and odors in the cantons of Loreto and Francisco de Orellana, evaluating  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{C}_6\text{H}_6$ ,  $\text{Cd}$ ,  $\text{Hg}$ , and  $\text{H}_2\text{S}$  within 500m radius. The percentages of organic, recyclable, and non-recyclable fractions were calculated by characterizing the garbage that was produced and collected. The GIRS examination identified major non-conformities (NC+) by taking into account technical, environmental, economic, social, and legal factors. For the Pichacay (Cuenca) and Las Iguanas (Guayaquil) landfills biogas estimation was done, forecasting methane and electrical energy output over the landfill's lifetime. Manage and tariff models were created for cantons lacking infrastructure, assessing metrics like the Net Present Value (NPV) and Internal Rate of Return (IRR).

The results indicated that the air quality parameters remained within regulatory limits, while the concentration of  $\text{H}_2\text{S}$  showed a slight perception of odor. The canton of Francisco de Orellana in 2022 generated 82.08 tons/day, collecting 73.11 tons/day (58% organic, 22% recyclable, and 20% non-recyclable). The canton of Loreto in 2023 generated 19.39 tons/día, collecting 13.15 tons/day (63% organic; 24% recyclable, and 13% non-recyclable). Other cantons showed a disposal of 559 tons/day in Cuenca and 4,400 tons/day in Guayaquil. The biogas estimation projected a maximum volume of 76,982.177  $\text{m}^3/\text{year}$  for Pichacay in 2021, with  $\text{CH}_4$  of 41,007.519  $\text{m}^3/\text{year}$  and generation of 24,313,579.99 kWh/year, enough to supply 1,522 households. With a maximum volume of 693,975.228

$\text{m}^3/\text{year}$  of biogas and  $402,505.632 \text{ m}^3/\text{year}$  of  $\text{CH}_4$ , Las Iguanas produced 229,272,368.53  $\text{kWh}/\text{year}$ , which was used to service 15,140 households. Billing values based on electricity consumption were calculated using the tariff model, yielding values of \$0.28 for 0  $\text{kWh}$ ; \$1.00 for 25  $\text{kWh}$ ; \$2.92 for 100  $\text{kWh}$ ; \$4.5 for 130  $\text{kWh}$ ; \$5.68 for 300  $\text{kWh}$ , and \$9.83 for 700  $\text{kWh}$ . The implementation of the management and tariff models was shown to be financially viable with a NPV of \$688,495.13 and an IRR of 9.61%.

In conclusion, climate, composition, waste volume, and biogas generation quantity must all be considered for the implementation of biogas capture systems. Conditions for energy use exist in two of the six cantons under examination: A capture system is already in place in Pichacay, and in Las Iguanas is currently undergoing implementation. The cantons of Loreto, Francisco de Orellana, and Aguarico require management strategies based on recycling, organic waste treatment, and recycling workers with a circular economy focus because they lack landfills and have low waste volumes. The landfill management model in Santa Cruz has to be updated. It is recommended that future research evaluate the biogas recovered in lixiviate plants to optimize energy efficiency and emissions reduction.

**Keywords:** Biogas; dump; methane; tariff model; waste landfill.

## **LISTADO DE ABREVIATURAS**

RSU	Residuos sólidos urbano
PPC	Producción Per Cápita
Kg	Kilogramo
Hab	Habitante
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
CO	Monóxido de carbono
O <sub>3</sub>	Ozono
NO <sub>2</sub>	Dióxido de nitrógeno
SO <sub>2</sub>	Dióxido de azufre
PM <sub>2,5</sub>	Material particulado menor a 2,5 micrones
PM <sub>10</sub>	Material particulado menor a 10 micrones
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	Benceno
Cd	Cadmio
Hg	Mercurio
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
GIRS	Gestión integral de residuos sólidos urbanos
NC+	No conformidad mayor
NC-	No conformidad menor
C	Conformidad
VAN	Valor Actual Neto
TIR	Tasa Interna de Retorno
CH <sub>4</sub>	Metano
KWh	Kilovatio hora
MAATE	Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica
GRECI	Gestión de Residuos Sólidos y Economía Circular Inclusiva
GADM	Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales
MWh	Megavatios hora
INEC	Nacional de Estadística y Censos
Ton	Tonelada
GWh	Gigavatio hora
GADMCA	Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del cantón Aguas Corrientes
GADMSC	Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del cantón Santa Cruz

GADM	Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del cantón Loreto
GADMFO	Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del cantón Francisco de Orellana
ARCERNR	Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables
MW	Megavatio
ONU	Organización de las Naciones Unidas
ODS	Objetivo de Desarrollo Sostenible
EPA	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos
CFV	Centro de Reciclaje Fabricio Valverde
C.R.T.I.B	Corrosivo, radiactivo, toxic, inflamable y biológico
PCI	Poder calorífico inferior
S.N.I.	Sistema Nacional Interconectado
IPCC	Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático
EPA	Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos
CNEL – EP	Corporación Nacional de Electricidad
VAN	Valor actual neto
TIR	Tasa interna de retorno financiero
AID	Área de influencia directa
All	Área de influencia indirecta
PC	Poder calorífico

# ÍNDICE CONTENIDO

<b>1 CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>2</b>
1.1 SITUACIÓN ACTUAL DE LA GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN EL ECUADOR.....	3
1.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN LAS PROVINCIAS DEL ECUADOR.....	5
1.3 APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO A PARTIR DE BIOMASA EN CUENCA, GUAYAQUIL Y QUITO.....	7
1.4 JUSTIFICACIÓN .....	8
1.5 OBJETIVOS .....	9
1.5.1 <i>Objetivos generales</i> .....	9
1.5.2 <i>Objetivos específicos</i> .....	9
1.6 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁMBITO DE ESTUDIO .....	10
1.7 UBICACIÓN GEOGRÁFICA .....	11
1.8 ASPECTOS DEMOGRÁFICOS.....	11
1.8.1 <i>Población provincia del Azuay</i> .....	11
1.8.2 <i>Población provincia de Pichincha</i> .....	11
1.8.3 <i>Población provincia de Orellana</i> .....	12
1.8.4 <i>Población provincia de Galápagos</i> .....	12
1.8.5 <i>Población provincia de Guayas</i> .....	12
<b>2 CAPÍTULO 2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICO .....</b>	<b>14</b>
2.1 TIPO DE GENERADORES DE RESIDUOS SÓLIDOS NO PELIGROSOS .....	14
2.2 PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS Y BILÓGICAS DE LOS RSU .....	15
2.2.1 <i>Propiedades físicas de los residuos aprovechables</i> .....	16
2.2.2 <i>Propiedades químicas de los residuos sólidos</i> .....	18
2.2.3 <i>Propiedades Biológicas de los RSU</i> .....	19
2.3 ANÁLISIS ELEMENTAL DE LOS COMPONENTES DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS .....	20
2.4 CONTENIDO ENERGÉTICO DE LOS COMPONENTES DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS.....	22
2.5 DISPOSICIÓN FINAL DE LOS RSU .....	23
2.5.1 <i>Tipos de rellenos sanitarios</i> .....	24
2.5.1.1 Relleno Sanitario Manual.....	24
2.5.1.2 Relleno Sanitario Semimecanizado .....	24
2.5.1.3 Relleno Mecanizado .....	24
2.5.2 <i>Selección del lugar para un relleno sanitario</i> .....	25
2.5.2.1 Volumen disponible para llenar .....	27
2.5.2.2 Morfología del terreno .....	27
2.5.2.3 Distancia a zonas protegidas .....	27
2.5.2.4 Impacto estético al paisaje .....	28
2.5.3 <i>Destrucción de la capa vegetal existente</i> .....	28
2.5.4 <i>Impacto estético al paisaje</i> .....	29
2.6 BIOGÁS GENERADO EN EL RELLENO SANITARIO .....	29
2.6.1 <i>Composición del biogás generado en un relleno sanitario RSU</i> .....	30
2.6.2 <i>Proceso de obtención del biogás</i> .....	31
2.6.2.1 Digestión aerobia de microorganismos .....	31
2.6.2.2 Digestión anaerobia de microrganismos .....	31
2.6.3 <i>Fases de la generación de biogás</i> .....	32
2.6.4 <i>Producción de biogás</i> .....	34
2.6.5 <i>Fuentes de generación de biogás</i> .....	35
2.6.6 <i>Factores que afectan la producción de biogás</i> .....	36
2.6.7 <i>Propiedades del biogás</i> .....	37
2.7 PLANTA DE BIOGÁS .....	38
2.8 VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE BIOGÁS.....	39
2.8.1 <i>Valor calorífico del biogás</i> .....	42
2.8.2 <i>Potencial energético de RSU</i> .....	42

2.8.3	<i>Potencia eléctrica</i> .....	45
2.9	MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS .....	46
2.9.1	<i>Modelos teóricos para estimar la producción de biogás</i> .....	46
2.10	ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE BIOGÁS GENERADO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS .....	53
2.11	SISTEMA DE EXTRACCIÓN DE BIOGÁS .....	53
2.11.1	<i>El sistema de captación de biogás</i> .....	55
2.11.2	<i>Sistema de conducción de biogás</i> .....	55
2.11.3	<i>Sistema de Succión</i> .....	57
<b>3</b>	<b>CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA .....</b>	<b>59</b>
3.1	CALIDAD DEL AIRE EN LOS SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL RSU .....	59
3.2	CONCENTRACIÓN DE ÁCIDO SULFÚRICO OLORES .....	60
3.3	CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	63
3.4	EVALUACIÓN DEL SERVICIO PÚBLICO DE GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	64
3.5	ESTIMAR LA CANTIDAD DE BIOGÁS GENERADA EN LOS RELLENOS SANITARIOS RSU .....	69
3.6	MODELO TARIFARIO DEL SERVICIO DE GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS .....	71
<b>4</b>	<b>CAPÍTULO 4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS EN LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>74</b>
4.1	CALIDAD DEL AIRE EN LOS SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL RSU .....	74
4.1.1	<i>Calidad del aire sitio de disposición final del cantón Francisco de Orellana</i> .....	74
4.1.1.1	Calidad del aire ambiente comunidad La Paz .....	76
4.1.1.2	Calidad del aire ambiente comunidad Los Laureles.....	77
4.1.1.3	Calidad del aire ambiente comunidad El Oro .....	78
4.1.1.4	Calidad del aire ambiente comunidad 6 de Octubre .....	79
4.1.2	<i>Calidad de aire ambiente del sitio de disposición final cantón Loreto</i> .....	80
4.2	CONCENTRACIÓN DE ÁCIDO SULFÚRICO ( $H_2S$ ) OLORES.....	81
4.3	CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	83
4.3.1	<i>Composición de los residuos sólidos urbanos del cantón Guayaquil</i> .....	83
4.3.2	<i>Composición de los residuos sólidos urbanos cantón Francisco de Orellana</i> .....	87
4.3.3	<i>Composición de los residuos sólidos urbanos cantón Loreto</i> .....	91
4.3.4	<i>Composición de los residuos sólidos urbanos cantón Santa Cruz</i> .....	94
4.4	EVALUACIÓN DEL SERVICIO PÚBLICO DE GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	96
4.4.1	<i>Aspecto técnico</i> .....	96
4.4.2	<i>Aspecto ambiental</i> .....	98
4.4.3	<i>Aspecto Económico</i> .....	99
4.4.4	<i>Aspecto Social</i> .....	100
4.4.5	<i>Aspecto Legal</i> .....	102
4.5	ESTIMACIÓN DE LA CANTIDAD DE BIOGÁS GENERADO EN LOS RELLENOS SANITARIOS .....	103
4.5.1	<i>Biogás generado en el relleno sanitario Las Iguanas</i> .....	103
4.5.2	<i>Biogás generado en el relleno sanitario Pichacay</i> .....	105
4.5.3	<i>Estimación del biogás producido LandGEM versión 3.03</i> .....	107
4.5.4	<i>Producción estimada de electricidad a partir de biogás</i> .....	109
4.6	MODELO TARIFARIO DEL SERVICIO DE GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS .....	110
<b>5</b>	<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....</b>	<b>115</b>
5.1	CONCLUSIONES .....	115
5.2	TRABAJO FUTURO .....	117
<b>6</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>118</b>
<b>7</b>	<b>ANEXO .....</b>	<b>125</b>
7.1	LISTADO DE PUBLICACIONES .....	125
7.2	CONTRIBUCIÓN EN LOS ARTÍCULOS.....	126

## ÍNDICE TABLAS

<i>Tabla 1. Categorización de cantones del Ecuador .....</i>	3
<i>Tabla 2. Generación diaria de residuos sólidos por provincia Ecuador, 2022 .....</i>	6
<i>Tabla 3. Balance Nacional de Energía Eléctrica julio 2024.....</i>	7
<i>Tabla 4. Ubicación geográfica del área de estudio .....</i>	10
<i>Tabla 5. Población del cantón Cuenca .....</i>	11
<i>Tabla 6. Población del cantón Quito.....</i>	11
<i>Tabla 7. Población de cantón Loreto, Francisco Orellana y Aguarico.....</i>	12
<i>Tabla 8. Población del cantón Santa Cruz.....</i>	12
<i>Tabla 9. Población del cantón Guayaquil.....</i>	12
<i>Tabla 10. Datos típicos sobre peso específico y contenido en humedad para residuos domésticos, comerciales, industriales y agrícolas [33,34]. .....</i>	17
<i>Tabla 11. Propiedades químicas de los residuos sólidos [6].....</i>	19
<i>Tabla 13. Datos típicos sobre el análisis elemental del material combustible presente en los residuos sólidos domésticos, comerciales e industriales [35] .....</i>	20
<i>Tabla 14. Datos típicos sobre el análisis elemental de los componentes combustibles en los RSU domésticos [35] .....</i>	21
<i>Tabla 15. Valores típicos de rechazos inertes y contenido energético de los RSU domésticos [36] .....</i>	22
<i>Tabla 16. Análisis elemental de los materiales orgánicos utilizados como alimentación en los procesos [37] .....</i>	23
<i>Tabla 17. Volumen Disponible Para Rellenar.....</i>	27
<i>Tabla 18. Topografía del Terreno.....</i>	27
<i>Tabla 19. Distancia a zonas protegidas.....</i>	28
<i>Tabla 20. Impacto Estético al Paisaje .....</i>	28
<i>Tabla 21. Destrucción de la Capa Vegetal Existente .....</i>	28
<i>Tabla 22. Impacto Estético al Paisaje .....</i>	29
<i>Tabla 23. Composición de biogás generado en un relleno sanitario RSU .....</i>	30
<i>Tabla 24. Duración típica de las fases de generación de biogás en un relleno sanitario [52] .....</i>	34
<i>Tabla 25. Componentes del biogás en función del substrato utilizado [53].....</i>	34
<i>Tabla 26. Fuente de generación de biogás .....</i>	35
<i>Tabla 27. Producción de biogás en función del substrato utilizado (Coombs, 1990) [56,60]. .....</i>	36
<i>Tabla 28. Factores que afectan la generación de biogás en un relleno sanitario.....</i>	36
<i>Tabla 29. Factores que afectan el proceso de la digestión anaeróbica en lodos.....</i>	37
<i>Tabla 30. Propiedades del biogás a 20 °C [7].....</i>	38
<i>Tabla 31. Método de purificación de biogás[67,68].....</i>	38
<i>Tabla 32. Modelos teóricos para estimar la producción de biogás .....</i>	48
<i>Tabla 33. Criterios para la selección del equipo transformador de energía eléctrica .....</i>	53
<i>Tabla 34. Tipos drenajes para el manejo del biogás .....</i>	54
<i>Tabla 35. Normas generales para concentraciones de contaminantes criterio en el aire ambiente ....</i>	59
<i>Tabla 36. Niveles de concentración de emisiones olfatorias en el relleno sanitario .....</i>	60
<i>Tabla 37. Componentes que emanan los rellenos sanitarios.....</i>	60
<i>Tabla 38. Indicadores operaciones para la evaluación de la GIRS.....</i>	64
<i>Tabla 39. Escala de cumplimiento de los aspectos e indicadores.....</i>	68
<i>Tabla 40. Valoración del nivel de cumplimiento y la conformidad [93].....</i>	68
<i>Tabla 41. Índice de generación de metano Modelo LandGEM -EPA.....</i>	70
<i>Tabla 42. Índice y potencia de generación de metano CH<sub>4</sub>.....</i>	70
<i>Tabla 43. Calidad de aire botadero de basura cantón Francisco de Orellana.....</i>	74
<i>Tabla 44. Niveles máximos permisibles para contaminantes no convencionales con efectos tóxicos y/o cancerígenos .....</i>	75

<i>Tabla 45. Calidad del aire ambiente comunidad La Paz .....</i>	76
<i>Tabla 46. Niveles máximos permisibles para contaminantes no convencionales con efectos tóxicos y/o cancerígenos .....</i>	76
<i>Tabla 47. Calidad del aire ambiente comunidad Los Laureles .....</i>	77
<i>Tabla 48. Niveles máximos permisibles para contaminantes no convencionales con efectos tóxicos y/o cancerígenos .....</i>	77
<i>Tabla 49. Calidad del aire ambiente comunidad El Oro.....</i>	78
<i>Tabla 50. Niveles máximos permisibles para contaminantes no convencionales con efectos tóxicos y/o cancerígenos .....</i>	78
<i>Tabla 51. Calidad del aire ambiente comunidad 6 de Octubre.....</i>	79
<i>Tabla 52. Niveles máximos permisibles para contaminantes no convencionales con efectos tóxicos y/o cancerígenos .....</i>	79
<i>Tabla 53. Calidad del aire ambiente botadero cantón Loreto.....</i>	80
<i>Tabla 54. Monitoreo de olores – H<sub>2</sub>S, punto blanco o punto de referencia .....</i>	82
<i>Tabla 55. Monitoreo de olores – H<sub>2</sub>S, punto de monitoreo a 500 m .....</i>	82
<i>Tabla 56. Monitoreo de olores – H<sub>2</sub>S, punto de monitoreo a 1000 m .....</i>	82
<i>Tabla 57. Toneladas ingresadas por sectores al relleno sanitario Las Iguanas .....</i>	85
<i>Tabla 58. Proyección de la generación de RSU del cantón Francisco de Orellana .....</i>	87
<i>Tabla 59. Proyección de los residuos sólidos urbanos recolectados del cantón Francisco de Orellana .....</i>	88
<i>Tabla 60. Producción Per-Cápita del cantón Francisco de Orellana.....</i>	89
<i>Tabla 61. Composición según potencial de aprovechamiento RSU, cantón Francisco de Orellana ....</i>	89
<i>Tabla 62. Proyección de los residuos sólidos urbanos generados en el cantón Loreto.....</i>	91
<i>Tabla 63. Proyección de los residuos sólidos urbanos recolectados en el cantón Loreto.....</i>	92
<i>Tabla 64. Producción Per-Cápita PPC del cantón Loreto.....</i>	93
<i>Tabla 65. Composición según potencial de aprovechamiento de los residuos y desechos sólidos caracterizados en el Cantón Loreto. .....</i>	93
<i>Tabla 66. Producción Per-Cápita PPC del cantón Santa Cruz .....</i>	95
<i>Tabla 67. Composición física de los residuos sólidos del cantón Santa Cruz.....</i>	95
<i>Tabla 68. Proyección de cantidad de residuos recolectada en el cantón Santa Cruz .....</i>	95
<i>Tabla 69. Análisis de biogás generado en el relleno sanitario Las Iguanas .....</i>	103
<i>Tabla 70. Análisis de biogás generado en el relleno sanitario Pichacay .....</i>	105
<i>Tabla 71. Propuesta de modelo tarifario GIRS .....</i>	113

## ÍNDICE FIGURA

<i>Figura 1. Tipo de generadores de residuos sólidos no peligrosos .....</i>	15
<i>Figura 2. Consideraciones técnicas, legales, económicas, ambientales y sociales.....</i>	26
<i>Figura 3. Fases de descomposición de los residuos sólidos y generación de biogás [50]. .....</i>	33
<i>Figura 4. Jerarquización de los residuos RSU .....</i>	40
<i>Figura 5. Valorización energética del biogás [71]-.....</i>	41
<i>Figura 6. Metodología para estimar la cantidad de biogás generada en los rellenos sanitarios RSU ---</i>	62
<i>Figura 7. Composición de los residuos RSU cantón Francisco de Orellana 2022-----</i>	90
<i>Figura 8. Composición de los residuos RSU cantón Loreto 2023 -----</i>	94
<i>Figura 9. Evaluación del aspecto ambiental .....</i>	98
<i>Figura 10. Evaluación del aspecto ambiental-----</i>	99
<i>Figura 11. Evaluación del aspecto económico .....</i>	100
<i>Figura 12. Evaluación del aspecto ambiental-----</i>	101
<i>Figura 13.Evaluación del aspecto legal .....</i>	102
<i>Figura 14. Biogás generado en el relleno sanitario Las Iguanas .....</i>	104
<i>Figura 15. Biogás generado en el relleno sanitario Pichacay-----</i>	106

<i>Figura 16. Predicción de la cantidad total de biogás del relleno sanitario Pichacay-Cuenca.</i> -----	108
<i>Figura 17. Predicción de la cantidad total de biogás del relleno sanitario Las Iguanas -----</i>	109
<i>Figura 18. Grupo 1. Electricidad producida en Pichacay y número de viviendas abastecidas con energía en el período 2021-2052 [32]. -----</i>	110
<i>Figura 19. Grupo 2. Electricidad producida en Pichacay y número de viviendas abastecidas con energía en el período 2053-2144. -----</i>	110
<i>Figura 20. Modelo de Gestión para los Residuos Sólidos No Peligrosos basado en Economía-----</i>	112

## ÍNDICE IMAGEN

<i>Imagen 1. Tubería que conecta con los pozos para el transporte de biogás -----</i>	56
<i>Imagen 2. Tubería y sub-cabezales para el sistema de captación de biogás -----</i>	56
<i>Imagen 3. Tubería y válvula de conducción de biogás relleno sanitario de Pichacay -----</i>	57
<i>Imagen 4. Medidor de conducción de biogás en operación relleno sanitario de Pichacay -----</i>	57
<i>Imagen 5. Calidad de aire punto de emisión botadero de basura cantón Francisco de Orellana -----</i>	75
<i>Imagen 6. Calidad del aire ambiente comunidad La Paz -----</i>	76
<i>Imagen 7. Calidad del aire ambiente Los Laureles -----</i>	77
<i>Imagen 8. Calidad del aire ambiente comunidad El Oro-----</i>	78
<i>Imagen 9. Calidad del aire ambiente comunidad 6 de Octubre -----</i>	79
<i>Imagen 10. Calidad del aire ambiente botadero cantón Loreto-----</i>	81
<i>Imagen 11. Monitoreo de olores del cantón Loreto -----</i>	83
<i>Imagen 12. Sectores A, B, C, D Relleno Sanitario Las Iguanas-----</i>	84
<i>Imagen 13. Caracterización de los residuos sólidos urbanos RSU del cantón Francisco de Orellana -</i>	90
<i>Imagen 14. Caracterización de los residuos del cantón Loreto -----</i>	94
<i>Imagen 15. Chimenea de biogás relleno sanitario Las Iguanas -----</i>	104

## ÍNDICE MAPA

<i>Mapa 1. Ubicación del área de investigación -----</i>	11
--	----

# CAPÍTULO 1.

# INTRODUCCIÓN

---

## **1 Capítulo 1. Introducción**

La generación de residuos sólidos urbanos (RSU) se ha incrementado a nivel mundial como consecuencia del crecimiento demográfico y del aumento en el consumo de recursos. En este contexto, uno de los principales desafíos globales es garantizar un servicio público eficiente de gestión integral de los residuos sólidos urbanos (RSU) [1]. Este desafío responde a múltiples factores, entre ellos, el manejo deficiente y la falta de recursos económicos en cada una de las fases del proceso de gestión, como la separación en la fuente, almacenamiento temporal, barrido y limpieza, recolección, transporte, aprovechamiento de residuos reciclables, tratamiento de residuos orgánicos y disposición final de residuos no aprovechables [2,3].

De ahí que en su informe What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050, el Banco Mundial señala que, para el año 2030, se espera que el mundo genere 2.590.00 millones de toneladas anuales de RSU, y para el 2050, esta cifra alcanzará los 3.400.00 millones de toneladas. Además, se estima una Producción Per Cápita (PPC) de 0,9 kg/hab/día, lo que representa un crecimiento global del 70 % en la generación de RSU para el año 2050 [4]. En América Latina y el Caribe, la PPC actual es de 0,6 kg/hab/día, y desde inicios del siglo XXI, ha comenzado a crear normativas orientadas a la gestión integral de los RSU. Esto responde al hecho de que una gestión deficiente de los RSU, especialmente en las fases como el almacenamiento temporal, recolección y disposición final, generan riesgos significativos para la salud pública y el medio ambiente [5–7].

Por su parte, el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), en su informe sobre la situación de la gestión de residuos sólidos en América Latina y el Caribe, indica que el promedio de cobertura de recolección de RSU es del 89,9 %, superior al promedio mundial del 73,6 %. Aproximadamente el 53 % de la población recibe el servicio de recolección entre 2 y 5 veces por semana, el 45,4 % diariamente, y apenas el 1,8 % una vez por semana [8]. No obstante, solo el 19,8 % de los municipios cuentan con planes de manejo de RSU, mientras que el 80,2 % carecen de ellos [9]. En el caso de Ecuador, con una población de 16.938.986 habitantes según el censo de 2022, se estima una generación anual de 5.3 millones de toneladas de RSU [10,11]. Esta situación representa un desafío significativo, debido a la ineficiencia en el manejo de residuos, lo que convierte esta actividad en una fuente de contaminación de los componentes ambientales: agua, aire y suelo. Además, los sitios destinados para la disposición final generan conflictos sociales debido a los impactos negativos sobre los recursos naturales en las áreas de influencia directa.

## **1.1 Situación actual de la gestión integral de los residuos sólidos urbanos en el Ecuador**

La gestión integral de residuos y desechos sólidos no peligrosos constituye el conjunto articulado de acciones y disposiciones regulatorias, operativas, económicas, financieras, administrativas, educativas, de planificación, monitoreo y evaluación, orientadas al manejo adecuado de estos residuos desde el punto de vista técnico, ambiental y socioeconómico (RCOA, Art. 577, 2019) [12,13].

En este contexto, el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE), a través del proyecto Gestión de Residuos Sólidos y Economía Circular Inclusiva (GRECI), categoriza a los cantones del Ecuador de acuerdo con el número de habitantes, en las siguientes categorías, detalladas a continuación.

*Tabla 1. Categorización de cantones del Ecuador*

No.	Categorización o segmentación	Detalle
1	Especial	Más de 1.000.00 habitantes
2	Grande	Entre 200.001.00 a 1.000.00 habitantes
3	Mediano	Entre 50.001 a 200.000 habitantes
4	Pequeño	Entre 15.001 a 50.000 habitantes
5	Micro	Menor 15.000 habitantes

*Fuente: MAATE - Proyecto GRECI. 2022*

De este modo la situación actual de las fases de la gestión integral RSU, en lo que corresponde a la fase separación en la fuente clasificada en residuos reciclables, residuos orgánicos y desechos no aprovechables, presenta importantes desafíos en todos los niveles cantonales del país. Según datos disponibles [14], los porcentajes de cantones que realizan esta práctica son los siguientes: cantones con categoría micro el 33,3 % realiza la separación en la fuente, el 66,7 % no lo hace, en los cantones pequeños 26,5 % realiza la separación, y el 73,5 % no la realiza, los cantones medianos 10,5 % aplica la separación en la fuente, en contraste con un 89,5 % que no lo hace, los cantones grandes el 0,0% realizan la separación en la fuente, el 100 % no aplica esta práctica, los cantones especiales al igual que los cantones grandes, el 0,0 % realiza la separación, y el 100 % no la ejecuta. En términos generales, a nivel nacional apenas el 14,1 % de los cantones implementa la separación en la fuente de los RSU, mientras que el 85,9 % no lo hace, lo cual evidencia una brecha significativa en la gestión inicial de los residuos sólidos en el país [15].

De igual forma, en la fase de almacenamiento temporal de los residuos sólidos urbanos (RSU) a nivel nacional, el 31,1 % de los municipios realiza almacenamiento diferenciado, mientras que el 68,9 % no lo realiza. En la fase de barrido y limpieza, a nivel nacional, el 59,1 % emplea barrido manual y el 40,9 % utiliza un sistema mixto. En la fase de recolección y transporte, el 16,6 % de los municipios lleva a cabo recolección diferenciada, mientras que el 83,4 % no la realiza. La cobertura de recolección en el área urbana alcanza el 93,8 %, y en el área rural, el 69,3 %. De ahí que la cantidad promedio de RSU recolectados a nivel nacional es de 12.196.01 toneladas por día.

De la misma forma, en la fase de acopio y transferencia a nivel nacional, el 78,9 % de los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales (GADM) no cuenta con centros de acopio ni sitios de transferencia; mientras que el 21,1 % sí dispone de centros de acopio. En lo que respecta a las fases de aprovechamiento de los residuos reciclables y tratamiento de los residuos orgánicos en los cantones del Ecuador, el 31,2 % cuenta con proyectos de aprovechamiento, mientras que el 68,8% no realiza dicho aprovechamiento. En cuanto al tratamiento de los residuos orgánicos, el 74,2 % de los GADM realiza compostaje, el 12,9 % aplica lombricultura, el 11,0 % utiliza el método Bokashi y el 1,9 % emplea la técnica Takakura [7]. Por ende, se estima que a nivel nacional se trata un volumen de residuos orgánicos de 819,75 toneladas/ mes, lo que equivale a un aprovechamiento del 2,36 % de los residuos orgánicos gestionados por los Gobiernos Municipales en el Ecuador.

Por último, en la fase de disposición final de los residuos sólidos urbanos RSU, lugar donde se depositan los residuos no aprovechables (desechos), estos deben ser gestionado en infraestructuras construidas técnicamente con el fin de evitar la contaminación de los recursos naturales como consecuencia de la descomposición de los RSU, proceso que genera gases (biogás), olores y lixiviados. Los residuos no aprovechables (desechos) son dispuestos mediante tres tipos de disposición final.

1. Celdas emergentes
2. Rellenos Sanitarios
3. Botaderos

La celda emergente y el relleno sanitario son sistemas de disposición final técnicamente diseñados y construidos, donde se depositan los desechos. Estos deben ser compactados y cubiertos diariamente con material adecuado, y contar con sistemas de evacuación de biogás, recolección de lixiviados y manejo de aguas de escorrentía. Esta situación contrasta con la de los botaderos, en los cuales no se realiza ningún control técnico, ni se

lleva a cabo la compactación ni el tapado diario de los residuos sólidos urbanos (RSU). En ese contexto, 122 gobiernos municipales disponen sus desechos en rellenos sanitarios, lo que representa el 55,2 %; 59 gobiernos municipales utilizan celdas emergentes, equivalente al 26,7 %; mientras que 50 gobiernos municipales depositan sus desechos en botaderos, lo que corresponde al 17,2 % [8]. Finalmente, en cuanto al aprovechamiento energético, de los 221 gobiernos municipales del Ecuador, solo tres municipios de los cantones de Cuenca, Quito y Guayaquil disponen de la infraestructura para el aprovechamiento del biogás a través de la generación de energía a partir de residuos sólidos, con una capacidad instalada de entre 2 y 4 megavatios hora (MWh).

Por consiguiente, la deficiente gestión integral de los residuos sólidos urbanos (RSU) afecta tanto a la salud pública como al medio ambiente, al contribuir significativamente a las emisiones de gases de efecto invernadero. Se estima que los RSU aportan aproximadamente el 20 % de las emisiones, seguido por los combustibles fósiles con un 35 % y la agricultura con un 40 %. En el año 2016, se emitieron 1.600 millones de toneladas de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) equivalente, lo que representa alrededor del 5,0 % de las emisiones mundiales, contribuyendo así al cambio climático. Además, los residuos dispuestos en vertederos generan gas de vertedero, conocido como biogás, compuesto principalmente por metano ( $\text{CH}_4$ ), un gas de efecto invernadero cuyo potencial de calentamiento es más de 86 veces superior al del  $\text{CO}_2$  en un período de 20 años [16,17]. Por otro lado, la descomposición de los residuos también genera lixiviados que contaminan cuerpos de agua como ríos, mientras que los residuos plásticos que no son recolectados afectan gravemente los recursos hídricos y los ecosistemas acuáticos durante cientos o incluso miles de años. En 2016, se generaron a nivel mundial aproximadamente 242 millones de toneladas de residuos plásticos.

## **1.2 Características de los residuos sólidos urbanos en las provincias del Ecuador**

La caracterización de los residuos sólidos urbanos (RSU) permite conocer su composición. A nivel internacional la categoría de residuos más importantes corresponde a los residuos de alimentos y residuos orgánicos que representan el 44% del total de residuos generados en el mundo. Los residuos reciclables se distribuyen de la siguiente manera: vidrio, 5%; metal, 4%; papel y cartón, 17%; plástico, 12%; caucho y cuero, 2%; madera, 2%; y otros, 14 % [18]. Por lo tanto, la composición de los RSU depende del nivel de económico la cultura y la ubicación.

En relación con el Ecuador, según el Diagnóstico sectorial de la gestión integral de residuos y desechos sólidos no peligrosos en municipios del Ecuador, emitido por el MAATE, se

indica que la PPC nacional es de 0,777 kg/hab/día, de la cual el 73,87 % corresponde a generadores domiciliarios (0,574 kg/hab/día) y el 26,3 % a generación asociada (0,203 kg/hab/día) [7]. Así pues, la generación de residuos sólidos en el año 2022 fue de 13,921.06 toneladas por día, lo que equivale a 5,103.087,59 toneladas por año [7].

*Tabla 2. Generación diaria de residuos sólidos por provincia Ecuador, 2022*

No.	Provincia	Generación (ton/día)
1	Azuay	717,13
2	Bolívar	144,44
3	Cañar	204,54
4	Carchi	128,79
5	Chimborazo	399,78
6	Cotopaxi	380,57
7	El Oro	552,97
8	Esmeraldas	455,42
9	Galápagos	21,77
10	Guayas	3.650,84
11	Imbabura	383,54
12	Loja	396,6
13	Los Ríos	687,2
14	Manabí	1.201,35
15	Morona Santiago	134,49
16	Napo	95,15
17	Orellana	112,98
18	Pastaza	83,68
19	Pichincha	2.768,12
20	Santa Elena	301,32
21	Santo Domingo	440,6
22	Sucumbíos	168,27
23	Tungurahua	472,63
24	Zamora Chinchipe	78,88

*Fuente: MAATE - Proyecto GRECI. 2023*

Por otra parte, la generación de residuos sólidos urbanos (RSU) por regiones en el Ecuador en el 2022 fue de 7,289.71 toneladas por día en la región Costa, 5.996,14 toneladas por día en la Sierra, 673,45 toneladas por día en el Oriente y 21,77 toneladas por día en la región Insular. De este total, el 52 % corresponde a la región Costa, el 43 % a la región Sierra y el 5 % a la región Insular.

### **1.3 Aprovechamiento energético a partir de biomasa en Cuenca, Guayaquil y Quito**

Ecuador, con una población de 16.938.986 habitantes según el censo de 2022 realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), ha registrado un incremento en el consumo energético per cápita, pasando de 1.304 kWh/hab. a 1.680 kWh/hab [19]. En consecuencia, para el año 2023, se reportó una demanda total de 23.640 GWh, lo que representa un aumento del 6,8 % en comparación con el año 2022. En cuanto al consumo de energía eléctrica por tipo de usuario en 2022, se registró un total de 22.132,19 GWh, distribuido de la siguiente manera: sector residencial, 7.832,94 GWh; sector comercial, 3.999,92 GWh; sector industrial, 6.137,30 GWh; alumbrado público, 1.521,40 GWh; y otros usos, 2.640,63 GWh [20]. El consumo energético per cápita anual en 2022, por provincias, fue el siguiente: Orellana, 835,28 kWh/hab.; Pichincha, 1.260,37 kWh/hab; Chimborazo, 858,93 kWh/hab.; Guayas, 1.662,37 kWh/hab.; y Galápagos, 1.892,58 kWh/hab [21,22].

Por otro lado, en el informe a la Nación de julio de 2024, la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables (ARCERNR) informó que la generación de energía a partir de biogás alcanzó los 8,32 MW, lo que representa apenas el 0,09 % de la matriz energética nacional. A continuación, en la tabla 3, se presenta el detalle de la generación y las fuentes de energía a nivel nacional en el año 2024 [23,24].

*Tabla 3. Balance Nacional de Energía Eléctrica julio 2024*

Energía Eléctrica	Generación		Entregada a Servicio Público	
	MW	%	GWh	%
<b>Renovable</b>	478.04	60,92	23.716,25	77,19
Hidráulica	5.215,17	58,00	23.213,25	75,55
Eólica	71,13	0,79	217,33	0,71
Fotovoltaica	28,13	0,31	38,59	0,13
Biomasa	155,30	1,73	208,90	0,68
Biogás	8,32	0,09	38,18	0,12
<b>No Renovable</b>	3.513,29	39,08	5.879,04	19,14
MCI	2.119,42	23,57	2.797,56	9,11
Turbogas	905,35	10,07	1.166,93	3,80
Importación	650,00	100	1.129,67	3,68
Colombia	540,00	83,08	1.102,59	3,59
Perú	110,00	16,92	27,08	0,09

*Fuente: Datos abiertos Ecuador 2024 (<https://datosabiertos.gob.ec>)*

## **1.4 Justificación**

El deficiente servicio público de gestión integral de los residuos sólidos urbanos (GIRS) representa un problema dado que se estima que el ritmo de generación de residuos aumentará del 30 % actual al 70 % para el año 2050. A menos que la ciudadanía tome conciencia sobre la necesidad de reducir el consumo, la separación en la fuente de residuos orgánicos, reciclables y no reciclables constituye la única alternativa viable para contener dicho incremento.

Aunque los gobiernos municipales son los responsables de la gestión integral de los residuos sólidos (GIRS), muchos de ellos no cuentan con planes de desarrollo de economía circular inclusiva. Estos planes deberían estar articulados en el plan de gestión integral municipal de residuos y desechos sólidos no peligrosos, el plan de reciclaje inclusivo y el plan municipal de reducción de residuos plásticos, los cuales deben ser aprobados por la autoridad ambiental competente.

Existe un manejo deficiente en la fase de disposición final de los residuos, lo que genera contaminación ambiental y afecta la calidad del aire. Estos residuos contribuyen con aproximadamente el 20 % de las emisiones de gases de efecto invernadero, incidiendo directamente en el cambio climático. Además, contaminan los cuerpos de agua debido a la descarga de lixiviados que superan los límites permisibles, lo cual representa un riesgo para la salud pública. En este contexto, la Organización de las Naciones Unidas (ONU), mediante el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) No. 13, promueve la adopción de medidas urgentes para hacer frente al cambio climático y mitigar sus efectos.

El manejo técnico de la fase de disposición final de los desechos en rellenos sanitarios resulta fundamental para una gestión integral eficiente de los residuos sólidos. Entre los avances técnicos necesarios se destacan la construcción de sistemas de drenaje y captación de biogás, los sistemas de recolección de lixiviados y los sistemas de captación de aguas de escorrentía. Para implementar sistemas de captación de biogás en rellenos sanitarios, es indispensable conocer previamente las condiciones climáticas (precipitación, temperatura y el viento), la composición y el volumen de residuos dispuestos en el relleno sanitario, así como de la cantidad de biogás generado, así como las condiciones óptimas para su máxima producción.

De igual manera, para el aprovechamiento del biogás generado por la descomposición anaeróbica de los residuos orgánicos, es fundamental considerar su calidad. La composición química del biogás depende principalmente de la antigüedad de los residuos

sólidos urbanos. El principal componente del biogás es el metano ( $\text{CH}_4$ ), que puede representar entre un 50 % y un 70 %, seguido del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), con una proporción del 30 % al 50 %. Además, contiene pequeñas cantidades de hidrógeno ( $\text{H}_2$ ), sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ), amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), monóxido de carbono (CO), nitrógeno ( $\text{N}_2$ ), oxígeno ( $\text{O}_2$ ) y trazas de compuestos orgánicos volátiles.

Previo a la determinación de las emisiones del biogás producido en los rellenos sanitarios del Ecuador y de los beneficios económicos asociados a su aprovechamiento, resulta necesario evaluar el servicio público de gestión integral de los residuos sólidos, considerando todas sus fases: separación en la fuente, almacenamiento temporal, barido y limpieza, recolección, transporte, acopio y transferencia, aprovechamiento de residuos reciclables, tratamiento de residuos orgánicos y disposición final. Para dicha evaluación, se consideraron aspectos técnicos, económicos, ambientales, legales y sociales. Se espera que los resultados obtenidos permitan valorar la viabilidad técnica y económica de un sistema de captación de biogás orientado a la generación de energía eléctrica.

## 1.5 Objetivos

### 1.5.1 Objetivos generales

- Estimar las emisiones de biogás en rellenos sanitarios de diferentes categorías, mediante el análisis de la calidad del aire, olores, caracterización, evaluación del cumplimiento de los aspectos técnicos, ambientales, económicos, sociales y legales y la aplicación del modelo de gases de vertedero LandGEM versión 3.03, a fin de determinar la factibilidad de implementar un sistema de captación y aprovechamiento de biogás para generar energía eléctrica y reducir las emisiones en la disposición final de residuos.

### 1.5.2 Objetivos específicos

- Analizar la calidad del aire en los sitios de disposición final de los cantones Francisco de Orellana y Loreto, así como en las comunidades aledañas a dichos sitios.
- Medir la concentración de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) presente en los sitios de disposición final de los residuos sólidos urbanos del Ecuador.
- Categorizar los residuos sólidos urbanos, a través de la caracterización de los residuos sólidos urbanos del cantón Francisco de Orellana, Loreto, a fin de

determinar su composición, así como la cantidad generada y recolectada que ingresan al relleno sanitario para la disposición final.

- Evaluar el servicio público de gestión integral de los residuos sólidos urbanos en los gobiernos municipales de los cantones Francisco de Orellana, Loreto, Aguarico y Santa Cruz, considerando los aspectos técnicos, económicos, ambientales, legales y sociales.
- Estimar la cantidad de biogás generado mediante la aplicación del modelo teórico LandGEM 3.03, desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), considerando para el cálculo el año de inicio de operación y de cierre del relleno sanitario, así como la composición y cantidad de los residuos sólidos.
- Establecer un modelo tarifario que considere los aspectos contables, económicos y financieros, con el fin de reflejar de manera precisa los costos operativos, la eficiencia del servicio y las proyecciones a largo plazo.

## 1.6 Características generales del ámbito de estudio

La investigación se realizó en las cuatro regiones del Ecuador. En la región Sierra, se incluyó el cantón Cuenca (relleno sanitario de Pichacay). En la región Costa, se analizó el relleno sanitario Las Iguanas. En la región Oriente, se consideraron el botadero de los cantones Francisco de Orellana (El Coca), Loreto y Aguarico. Finalmente, en la región Insular, se evaluó el complejo ambiental del cantón Santa Cruz Centro de Reciclaje Fabricio Valverde (CFV) [25,26].

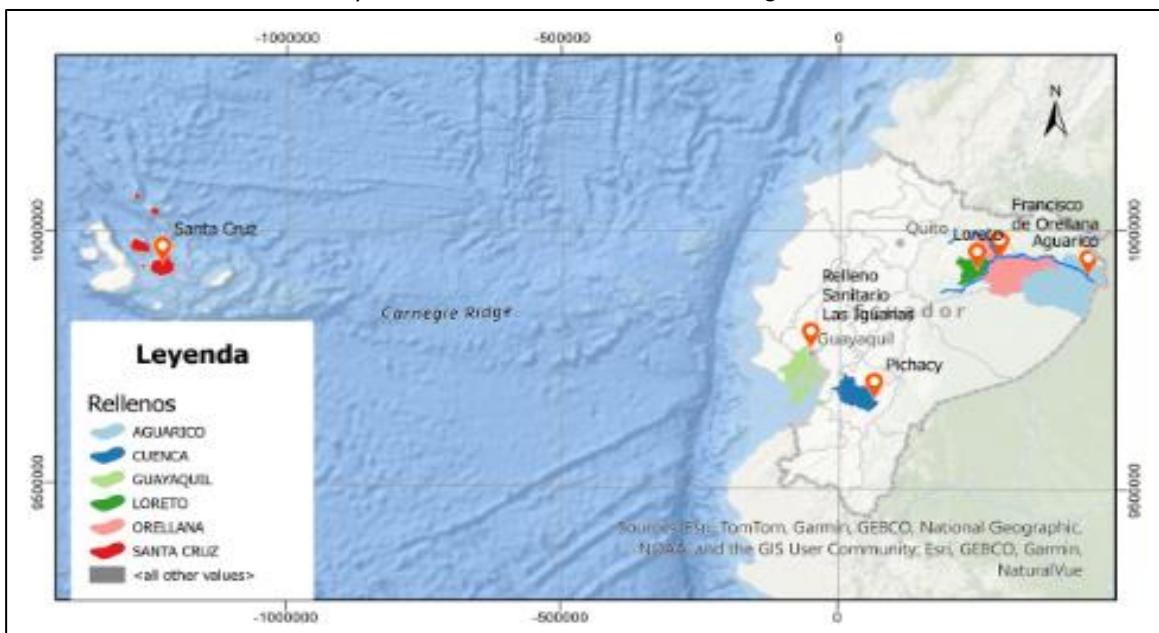
*Tabla 4. Ubicación geográfica del área de estudio*

Región	Provincia	Cantón	Fecha apertura relleno sanitario	Vida útil
Sierra	Azuay	Cuenca	2001	Hasta 2031
	Pichincha	Quito	2003	Ampliación 2025
Costa	Guayas	Guayaquil	1994	Ampliación 2025
Oriente	Orellana	Francisco de Orellana	2025	2027
		Loreto	2024	2048
		Aguarico	-----	----
Insular	Galápagos	Santa Cruz	2004	---

*Fuente: Censo 2022, Ecuador*

## 1.7 Ubicación geográfica

*Mapa 1. Ubicación del área de investigación*



*Elaborado por: Elaboración propia, 2025*

## 1.8 Aspectos demográficos

### **1.8.1 Población provincia del Azuay**

*Tabla 5. Población del cantón Cuenca*

Cantón	Sector	Total	Sexo al nacer	
			Hombres	Mujeres
	Total	596.101	281.823	314.278
Cuenca	Urbana	361.524	171.684	189.840
	Rural	234.577	110.139	124.438

*Fuente: Censo 2022, Ecuador*

## 1.8.2 Población provincia de Pichincha

Tabla 6. Población del cantón Quito

Cantón	Sector	Total	Sexo al nacer	
			Hombres	Mujeres
Quito	Total	2.679.722	1.291.774	1.387.948
	Urbana	1.763.275	847.321	915.954
	Rural	916.447	444.453	471.994

*Fuente: Censo 2022, Ecuador*

### 1.8.3 Población provincia de Orellana

*Tabla 7. Población de cantón Loreto, Francisco Orellana y Aguarico*

Cantón	Sector	Total	Sexo al nacer	
			Hombres	Mujeres
	Total	95130	48163	46967
Francisco de Orellana	Urbana	51281	25371	25910
	Rural	43849	22792	21057
	Total	6872	3487	3385
Aguarico	Urbana	657	321	336
	Rural	6215	3166	3049
	Total	27720	14141	13579
Loreto	Urbana	5377	2610	2767
	Rural	22343	11531	10812

*Fuente: Censo 2022, Ecuador.*

### 1.8.4 Población provincia de Galápagos

*Tabla 8. Población del cantón Santa Cruz*

Cantón	Sector	Total	Sexo al nacer	
			Hombres	Mujeres
	Total	17233	8637	8596
Santa Cruz	Urbana	12696	6296	6400
	Rural	4537	2341	2196

*Fuente: Censo 2022, Ecuador*

### 1.8.5 Población provincia de Guayas

*Tabla 9. Población del cantón Guayaquil*

Cantón	Sector	Total	Sexo al nacer	
			Hombres	Mujeres
	Total	2746.403	1.344.265	1.402.138
Guayaquil	Urbana	2.650.288	1.295.478	1.354.810
	Rural	96.115	48.787	47.328

*Fuente: Censo 2022, Ecuador.*

## **CAPÍTULO 2.**

# **FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA**

---

## **2 Capítulo 2. Fundamentación Teórico**

La gestión integral de residuos y desechos sólidos no peligrosos se concibe como un proceso estructurado que integra un conjunto de acciones, normativas y mecanismos de carácter operativo, administrativo, financiero, educativo y de planificación, orientados al manejo técnico de los residuos sólidos urbanos (RSU). Este enfoque incorpora criterios técnicos, ambientales y socioeconómicos, además de incluir actividades de monitoreo y evaluación que permiten asegurar una gestión eficiente y sostenible. En este sentido, las fases que componen la gestión integral de estos residuos deben ser implementadas conforme al modelo de gestión adoptado por los gobiernos autónomos descentralizados municipales y metropolitanos, el cual debe contar con la aprobación de la Autoridad Ambiental Nacional. Dicho modelo debe ejecutarse de manera sistemática y eficiente, en concordancia con los principios de sostenibilidad ambiental y responsabilidad social [27,28]. A continuación, se detalla las fases de la gestión integral de residuos y desechos sólidos no peligrosos.

1. Separación en la fuente
2. Almacenamiento temporal
3. Barrido y limpieza
4. Recolección
5. Transporte
6. Acopio y/o transferencia
7. Aprovechamiento
8. Tratamiento
9. Disposición final.

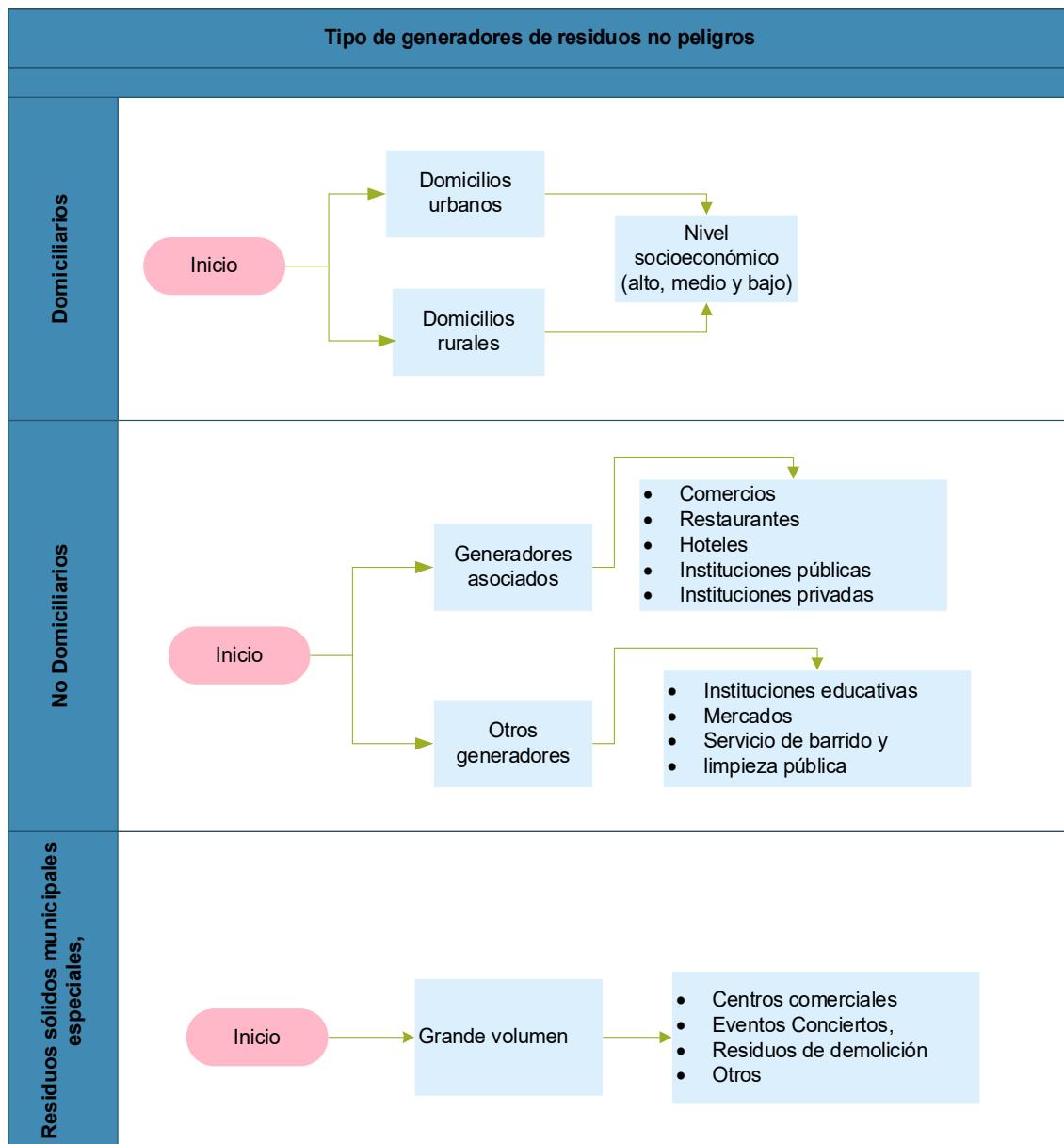
En la fase de separación en la fuente, el generador realiza la clasificación en residuos orgánicos, reciclables y desechos. De ahí que a los residuos sólidos no peligrosos se definen como aquellos objetos, materiales, sustancias o elementos en estado sólido que, de acuerdo con los criterios establecidos por el código C.R.T.I.B., no presentan características de peligrosidad. Estos residuos son generados como resultado del uso o consumo de bienes en actividades de carácter doméstico, industrial, comercial, institucional o de servicios [29].

### **2.1 Tipo de generadores de residuos sólidos no peligrosos**

De acuerdo con la guía para la cuantificación y caracterización de los residuos y desechos sólidos no peligroso en cantones del Ecuador, emitido por el proyecto Gestión de residuos

sólidos y economía circular inclusiva (GRECI). Establecen que para obtener la composición y la cantidad de residuos sólidos y desechos no peligrosos de un territorio, se deben identificar los tipos de generadores que se detallan a continuación [30].

*Figura 1. Tipo de generadores de residuos sólidos no peligrosos*



Fuente: GRECI 2023, [30]

## 2.2 Propiedades físicas, químicas y bilógicas de los RSU

Las propiedades físicas, químicas, biológicas y la composición de los residuos sólidos urbanos (RSU) deben ser consideradas para el desarrollo y diseño de sistemas de gestión integral de residuos sólidos, ya que constituyen la base para la toma de decisiones en relación con el modelo de gestión [31].

### 2.2.1 Propiedades físicas de los residuos aprovechables

En este sentido, las características físicas que deben tenerse en cuenta son:

**Peso específico:** Es el peso de un material por unidad de volumen (kg/m), frecuentemente se refiere a residuos sueltos, encontrados en los contenedores, no compactados, compactados.

**Contenido de Humedad:** Es la medida del peso-húmedo, la humedad de una muestra se expresa como un porcentaje del peso del material húmedo. El contenido humedad entre el 15 y 40 %, según la composición de los residuos, la estación del año y las condiciones climáticas.

$$M = \left( w - \frac{d}{w} \right) 100 \quad (1)$$

Donde:

M= Contenido de humedad, porcentaje

w = Peso inicial de la muestra según se entrega (kg)

d = Peso de la muestra después de secarse a 105°C (kg.).

**Tamaño de la partícula:** El tamaño y la distribución del tamaño de los componentes de los materiales en los residuos sólidos son una consideración importante dentro de la recuperación de materiales, especialmente con medios mecánicos, como cribas, trómel y separadores magnéticos.

**Capacidad de campo:** La cantidad total de humedad que puede ser retenida por una muestra de residuo sometida a la acción de la gravedad. La capacidad de campo de los residuos es importante para determinar la formación de lixiviados en los rellenos sanitarios. El exceso de agua sobre la capacidad de campo se emitirá en forma de lixiviado. La capacidad de campo varía con el grado de presión aplicada y el estado de descomposición del residuo. La capacidad de campo de los residuos no seleccionados y no compactados de orígenes domésticos y comerciales está en la gama del 50 al 60 % [32].

*Tabla 10. Datos típicos sobre peso específico y contenido en humedad para residuos domésticos, comerciales, industriales y agrícolas [33,34].*

Tipos de residuos	Peso específico, kg/m <sup>3</sup>		Contenido en humedad, % en peso	
	Rango	Típico	Rango	Típico
<b>Domésticos (no compactados)</b>				
Residuos de comida (mezclados)	131-481	291	50-80	70
Papel	42-131	89	4-10	6
Cartón	42-80	50	4-8	5
Plásticos	42-131	65	1-4	2
Textiles	42-101	65	6-15	10
Goma	101-202	131	1-4	2
Cuero	101-261	160	8-12	10
Residuos de jardín	59-225	101	30-80	60
Madera	131-320	237	15-40	20
Vidrio	160-481	196	1-4	2
Latas de hojalata	50-160	89	2-4	3
Aluminio	65-240	160	2-4	2
Otros metales	131-1.151	320	2-4	3
Suciedad, cenizas, etc.	320-1.000	481	6-12	8
Cenizas	650-831	745	6-12	6
Basuras	89-181	131	5-20	15
<b>Residuos de jardín domésticos</b>				
Hojas (sueltas y secas)	30-148	59	20-40	30
Hierba verde (suelta y húmeda)	208-297	237	40-80	60
Hierba verde (húmeda y compactada)	593-831	593	50-90	80
Residuos de jardín (triturados)	267-356	297	20-70	50
Residuos de jardín (compostados)	267-386	326	40-60	50
<b>Urbanos</b>				
En camión compactador	178-451	297	15-40	20
En vertedero, medianamente compactados	362-498	451	15-40	25
En vertedero, bien compactados	590-742	600	15-40	25
<b>Comerciales</b>				
Residuos de comida (húmedos)	475-950	540	50-80	70
Aparatos	148-202	181	0-2	1
Cajas de madera	110-160	110	10-30	20
Podas de árboles	101-181	148	20-80	5
Basura (combustible)	50-181	119	10-30	15

Basura (no combustible)	181-362	300	5-15	10
Basura (mezclada)	139-181	160	10-25	15
<b>Construcción y demolición</b>				
Demolición mezclados (no combustible)	1.000-1.600	1.421	2-10	4
Demolición mezclados (combustible)	300-400	360	4-15	8
Construcción mezclados (combustible)	181-360	261	4-15	8
Hormigón roto	1.198-1.800	1.540	0-5	-
<b>Industriales</b>				
Fangos químicos (húmedos)	801-1.101	1.000	75-99	80
Cenizas volantes	700-900	800	2-10	4
Restos de cuero	100-250	160	6-15	10
Chatarra metálica (pesada)	1.501-2.000	1.780	0-5	-
Chatarra metálica (ligera)	498-900	740	0-5	-
Chatarra metálica (mezclada)	700-1.500	900	0-5	-
Aceites, alquitranes, asfaltos	801-1.000	950	0-5	2
Serrín	101-350	291	10-40	20
Residuos textiles	101-220	181	6-15	10
Madera (mezclada)	400-676	498	30-60	25
<b>Agrícolas</b>				
Agrícolas (mezclados)	400-751	561	40-80	50
Animales muertos	202-498	359	-	-
Residuos de frutas (mezclados)	249-751	359	60-90	75
Estiércol (húmedo)	899-1.050	1.000	75-96	94
Residuos de vegetales (mezclados)	202-700	359	60-90	75

## 2.2.2 Propiedades químicas de los residuos sólidos

Las propiedades químicas de los residuos sólidos urbanos (RSU) constituyen un aspecto esencial en la evaluación de las alternativas de tratamiento y valorización. El análisis químico permite identificar los elementos que componen las fracciones orgánica e inorgánica de los residuos, lo cual es clave para establecer parámetros que faciliten la modelación de procesos como la descomposición y la generación de biogás con fines de aprovechamiento energético. Entre los principales elementos evaluados se encuentran el carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N), azufre (S) y el contenido de cenizas. A continuación, se detallan las principales propiedades químicas de los RSU, que son:

1. Análisis físico.

2. Punto de fusión de las cenizas.
3. Análisis elemental.
4. Contenido energético

*Tabla 11. Propiedades químicas de los residuos sólidos [6]*

Propiedad	Ensayo	Descripción
Análisis físico	Humedad	Pérdida de humedad cuando se calienta a 105 °C durante una hora.
	Materia volátil combustible	Pérdida de peso adicional por ignición a 950°C en crisol cubierto
	Carbono fijo	Rechazo combustible dejado después de retirar la materia volátil
	Ceniza	Peso del rechazo después de la incineración en un crisol abierto
Punto de fusión de la ceniza		Es la temperatura en la que la ceniza resultante de la incineración de residuos se transforma en sólido (escoria) por la fusión y la aglomeración. Las temperaturas típicas de fusión para la formación de escorias de residuos sólidos oscilan entre 1.100°C y 1.200° C.
Análisis elemental de los componentes de residuos sólidos.		El análisis elemental de un residuo normalmente implica la determinación del porcentaje de C (carbono), H (hidrógeno), O (oxígeno), N (nitrógeno), S (azufre) y ceniza.
Contenido energético de los componentes de los residuos sólidos		El contenido energético de los componentes orgánicos en los RSU se puede determinar de la siguiente forma. Utilizando una caldera a escala real como calorímetro Utilizando una bomba calorimétrica de laboratorio Por cálculo, si se conoce la composición elemental.

### 2.2.3 Propiedades Biológicas de los RSU

Las propiedades de los residuos orgánicos, desde el punto de vista de su naturaleza orgánica, se clasifican en las siguientes categorías:

1. Solubles en agua, tales como azúcares, féculas, aminoácidos, y diversos ácidos orgánicos.
2. Hemicelulosa, un producto de condensación de azúcares con cinco y seis carbonos.
3. Celulosa, un producto de condensación de glucosa con seis carbonos.
4. Grasas, aceites y ceras, que son ésteres de alcoholes y ácidos grasos de cadena larga.
5. Lignina, un material polímero que contiene anillos aromáticos con grupos metoxi ( $\text{CH}_3\text{O}$ ).

6. Lignocelulosa, una combinación de lignina y celulosa.
7. Proteínas, que están formadas por cadenas de aminoácidos.

Por lo tanto, para determinar la biodegradabilidad de los componentes de los residuos orgánicos, se calcula el contenido de lignina del residuo con el fin de estimar su fracción biodegradable, mediante la siguiente ecuación [23].

$$BF = 0,83 - 0,028 \text{ } LC \quad (2)$$

Donde:

$F$ = Fracción biodegradable expresada en base a los sólidos volátiles (SV).

0,83= Constante empírica

0,028 = Constante empírica

LC= Contenido de lignina de los SV expresado como un porcentaje en peso seco.

### 2.3 Análisis elemental de los componentes de residuos sólidos urbanos

Para el aprovechamiento y tratamiento de los residuos sólidos urbanos (RSU), es fundamental conocer su composición y la forma en que están constituidos. A continuación, se describen los componentes de cada tipo de residuo.

*Tabla 12. Datos típicos sobre el análisis elemental del material combustible presente en los residuos sólidos domésticos, comerciales e industriales [35]*

Residuos	Porcentaje en peso (base seca)					
	Carbono	Hidrógeno	Oxígeno	Nitrógeno	Azufre	Cenizas
<b>Comida y productos de comida</b>						
Grasas	73,0	11,5	14,8	0,4	0,1	0,2
Residuos de comida (mezclados)	48,0	6,4	37,6	2,6	0,4	5,0
Residuos de frutas	48,5	6,2	39,5	1,4	0,2	4,2
Residuos de carne	59,6	9,4	24,7	1,2	0,2	4,9
<b>Productos de papel</b>						
Cartón	43,0	5,9	44,8	0,3	0,2	5,0
Revistas	32,9	5,0	38,6	0,1	0,1	23,3
Papel de periódico	49,1	6,1	43,0	<0,1	0,2	1,5
Papel (mezclado)	43,4	5,8	44,3	0,3	0,2	6,0
Cartones encerados	59,2	9,3	30,1	0,1	0,1	1,2

<b>Plásticos</b>						
Plásticos (mezclados)	60,0	7,2	22,8	-	-	10,0
Polietileno	85,2	14,2	-	<0,1	<0,1	0,4
Poliestireno	87,1	8,4	4,0	0,2	-	0,3
Poliuretano	63,3	6,3	17,6	6,0	<0,1	4,3
Policloruro de vinilo	45,2	5,6	1,6	0,1	0,1	2,0
<b>Textiles, goma, cuero</b>						
Textiles	48,0	6,4	40,0	2,2	0,2	3,2
Goma	69,7	8,7	-	-	1,6	20,0
Cuero	60,0	8,0	1.156	10,0	0,4	10,0
Madera, arboles, etc.						
Residuos de jardín	46,0	6,0	38,0	3,4	0,3	6,3
Madera (madera verde)	50,1	6,4	42,3	0,1	0,1	1,0
Maderas auras	49,6	6,1	43,2	0,1	<0,1	0,9
Madera mezclada	49,5	6,0	42,7	0,2	<0,1	1,5
Viruta de madera (mezclada)	48,1	5,8	45,5	0,1	<0,1	0,4
<b>Vidrios</b>						
Vidrio y minerales	0,5	0,1	0,4	<0,1	-	98,9
Metales						
Metales (mezclados)	4,5	0,6	4,3	<0,1	-	90,5
Misceláneos						
Barreduras de oficina	24,3	3,0	4,0	0,5	0,2	68,0
Aceites, pinturas	66,9	9,6	5,2	2,0	-	16,3
Combustible derivado de residuos (CDR)	44,7	6,2	38,4	0,7	<0,1	9,9

Tabla 13. Datos típicos sobre el análisis elemental de los componentes combustibles en los RSU domésticos [35]

Componentes	Porcentaje en peso (base seca)					
	Carbono	Hidrógeno	Oxígeno	Nitrógeno	Azufre	Cenizas
<b>Orgánicos</b>						
Residuos de comida	48,0	6,4	37,6	2,6	0,4	5,0
Papel	43,5	6,0	44,0	0,3	0,2	6,0
Cartón	44,0	5,9	44,6	0,3	0,2	5,0
Plásticos	60,0	7,2	22,8	-	-	10,0
Textiles	55,0	6,6	31,2	4,6	0,15	2,5
Goma	78,0	10,0	-	2,0	-	10,0

Cuero	60,0	8,0	11,6	10,0	0,4	10,0
Residuos de jardín	47,8	6,0	38,0	3,4	0,3	4,5
Madera	49,5	6,0	42,7	0,2	0,1	1,5
Inorgánicos						
Vidrio	0,5	0,1	0,4	<0,1	-	98,9
Metales	4,5	0,6	4,3	<0,1	-	90,5
Suciedad, cenizas, etc.	26,3	3,0	2,0	0,5	0,2	68,0

## 2.4 Contenido energético de los componentes de los residuos sólidos

A continuación, se presenta un resumen general del contenido energético promedio (poder calorífico) de los principales componentes de los residuos sólidos urbanos (RSU).

Tabla 14. Valores típicos de rechazos inertes y contenido energético de los RSU domésticos [36]

Componentes	Rechazos inertes, porcentaje		Energía, Kcal/kg	
	Rango	Típico	Rango	Típico
<b>Orgánicos</b>				
Residuos de comida	2 - 8	5.0	833 – 1.667	1.111
Papel	4 - 8	6.0	2.778 – 4.444	4.000
Cartón	3 - 6	5.0	3.333 – 4.167	3.889
Plásticos	6 - 20	10.0	6.667 – 8.889	7.778
Textiles	2 - 4	2.5	3.611 - 4.444	4.167
Goma	8 - 20	10.0	5000 – 6.667	5.556
Cuero	8 - 20	10.0	3.611 – 4.722	4.167
Residuos de jardín	2 - 6	4.5	556 – 4.444	1.556
Madera	0.6 - 2	1.5	4.167 - 4.722	4.444
Orgánicos misceláneos	-	-	-	-
<b>Inorgánicos</b>				
Vidrio	99 - 99 +	98.0	28 - 56	33
Latas de hojalata	96 - 99 +	98.0	56 - 278	167
Aluminio	90 - 99 +	96.0	-	-
Otros metales	94 - 99+	98.0	56 - 278	167
Suciedad, cenizas, etc.	60 - 80	70.0	556 – 2,778	1.667

Fuente: Propiedades de los RSU- Gestión RSU

Es decir, la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (RSU) puede ser utilizada para la elaboración de productos orgánicos, como el compost. Por ello, es importante conocer la disponibilidad de nutrientes para los microorganismos, así como valorar los posibles usos finales de los materiales restantes tras la conversión biológica, como se muestra a continuación en la Tabla 16.

*Tabla 15. Análisis elemental de los materiales orgánicos utilizados como alimentación en los procesos [37]*

Componente	Unidad	Sustrato de alimentación (base seca)			
		Papel periódico	Papel de oficina	Residuos de jardín	Residuos de Comida
NH <sub>4</sub> -N	ppm	4	61	149	205
NO <sub>3</sub> -N	ppm	4	218	490	4278
P	ppm	44	295	3500	4900
PO <sub>4</sub> -P	ppm	20	164	2210	3200
K	ppm	0,35	0,29	2,27	4,18
SO <sub>4</sub> -S	ppm	159	324	882	855
Ca	%	0,01	0,10	0,42	0,43
Mg	%	0,02	0,04	0,21	0,16
Na	%	0,74	1,05	0,06	0,15
B	ppm	14	28	88	17
Se	ppm	--	--	<1	<1
Zn	ppm	22	177	20	21
Mn	ppm	49	15	56	20
Fe	ppm	57	396	451	48
Cu	ppm	12	14	7,7	6,9
Co	ppm	--	--	5,0	3,0
Mo	ppm	--	--	1,0	<1
Ni	ppm	--	--	9,0	4,5
W	ppm	--	--	4,0	3,3

*Fuente: Propiedades de los RSU- Gestión RSU*

## 2.5 Disposición final de los RSU

Se trata de una técnica de ingeniería orientada al confinamiento seguro y controlado de desechos y/o residuos sólidos. Esta práctica consiste en su disposición dentro de celdas especialmente diseñadas y habilitadas, ubicadas en áreas lo más reducidas posible, con el objetivo de evitar impactos negativos al medio ambiente, como la contaminación del agua, suelo y aire, así como prevenir riesgos para la salud y seguridad pública [38].

El proceso incluye la distribución, acomodo y compactación de los residuos, con el fin de disminuir su volumen al máximo posible. Posteriormente, estos son cubiertos, al menos una vez al día, con una capa de tierra u otro material inerte. Además, se implementan medidas para el control de gases, lixiviados y la proliferación de vectores (AM 061, 2015).

### **2.5.1 Tipos de rellenos sanitarios**

Un relleno sanitario está influenciado principalmente por las características topográficas del terreno. No obstante, también inciden factores como la disponibilidad de materiales y la profundidad del nivel freático. En general, se reconocen tres métodos diferenciados para la construcción de este tipo de infraestructuras.

1. Relleno Sanitario Manual
2. Relleno Sanitario Semimecanizado
3. Relleno Mecanizado

#### **2.5.1.1 Relleno Sanitario Manual**

El relleno sanitario manual constituye una alternativa de disposición final de residuos sólidos, especialmente concebida para localidades con menos de 40.000 habitantes y una generación diaria que no supere las 20 toneladas. Su principal particularidad radica en la utilización de procedimientos y herramientas manuales. No obstante, con el fin de optimizar las labores de compactación y cobertura, se puede contemplar el uso complementario de maquinaria ligera, como un minicargador [39].

#### **2.5.1.2 Relleno Sanitario Semimecanizado**

El relleno sanitario Semimecanizado está orientado a centros poblacionales con una población comprendida entre 40.000 y 100.000 habitantes, cuya generación de residuos sólidos se sitúa entre 20 y 40 toneladas diarias. Su principal característica consiste en la utilización parcial y continua de equipos mecanizados pesados para las actividades de compactación y cobertura, tales como bulldozers o tractores de oruga con una potencia aproximada de 45 hp. Adicionalmente, y según las necesidades operativas, estas labores pueden ser complementadas con maquinaria destinada al transporte del material de cobertura [40].

#### **2.5.1.3 Relleno Mecanizado**

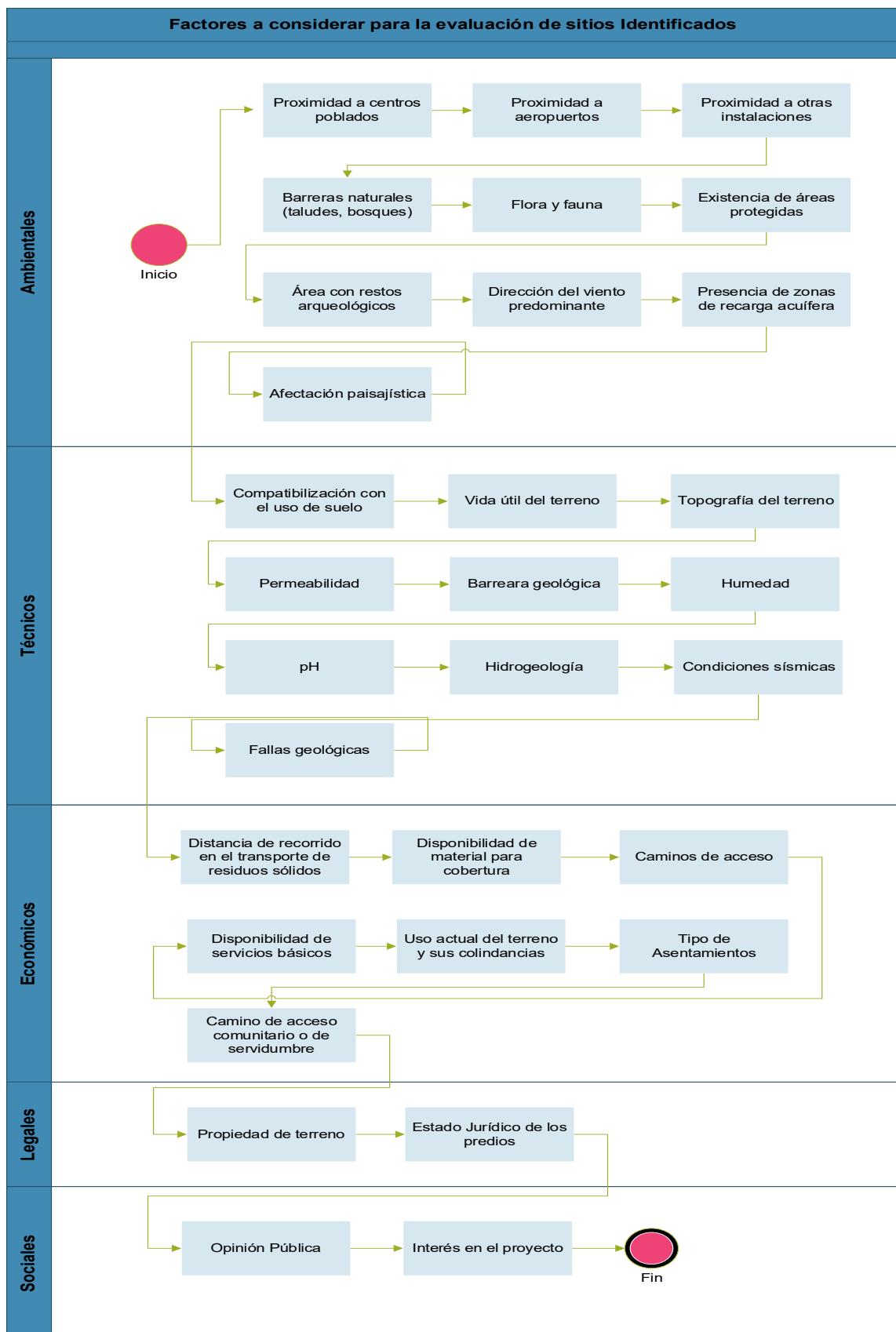
El relleno sanitario mecanizado está destinado a ciudades con más de 100.000 habitantes y una generación diaria de residuos sólidos superior a las 40 toneladas. Su característica

fundamental es la utilización continua y combinada de maquinaria pesada en el sitio de operación, incluyendo equipos como tractores compactadores, bulldozers, retroexcavadoras cargadoras, palas frontales cargadoras, así como maquinaria de apoyo, entre ellas camiones cisterna y volquetes [40]

### **2.5.2 Selección del lugar para un relleno sanitario**

La duración operativa de un relleno sanitario compactado está condicionada por la extensión del terreno disponible para su implementación. En cambio, en los rellenos manuales, el criterio de superficie adquiere una mayor relevancia. Por ello, al seleccionar un sitio para la construcción de un relleno sanitario, se recomienda optar por un terreno que permita una operación mínima de 15 años, tomando en cuenta el crecimiento proyectado de la población, con el propósito de alargar la vida útil y optimizar recursos empleados en su adquisición y acondicionamiento. De ahí que la selección del lugar para el relleno tiene cinco aspectos muy importantes detallados a continuación.

Figura 2. Consideraciones técnicas, legales, económicas, ambientales y sociales



Fuente: Guía construcción [40].

### 2.5.2.1 Volumen disponible para rellenar

La capacidad volumétrica del sitio no solo está determinada por la topografía del terreno, sino también por factores adicionales como las características del suelo especialmente su estabilidad, el grado de amenaza sísmica en la zona, la naturaleza de los residuos sólidos a disponer y el tipo de material utilizado para la cobertura diaria o final.

*Tabla 16. Volumen Disponible Para Rellenar*

Volumen disponible para rellenar	Relleno grande o mediano con equipo mecánico
	Valor acordado
Para 15 años y más	2,0
Para 5 - 15 años	0,2-1,8
Para 5 años	0,0

*Fuente: Guía construcción [40].*

### 2.5.2.2 Morfología del terreno

La configuración topográfica del terreno influye directamente en la altura alcanzable del cuerpo de residuos, en su estabilidad estructural y en la evacuación natural de los lixiviados mediante pendientes. Además, representa un factor económico relevante, ya que condiciona el volumen de movimientos de tierra requeridos, como la excavación y nivelación del área.

*Tabla 17. Topografía del Terreno*

Topografía del terreno	Relleno grande o mediano con equipo mecánico	Relleno manual
	Valor acordado	Valor acordado
Terreno plano con poca inclinación (1 - 3 %)	2,2	2,4
Terreno casi plano, ligeramente inclinado (3 - 12 %)	0,0 – 2,0	0,0-2,2
Terreno con inclinación > 12 %, en forma de hueco o fosa, quebrada o talud	0,0	0,0

*Fuente: Guía construcción [40].*

### 2.5.2.3 Distancia a zonas protegidas

La proximidad podría alterar el equilibrio ecológico debido a las emisiones generadas y al tránsito constante de vehículos recolectores. En el caso que el relleno sanitario se encuentre, dentro de áreas protegidas, cuando no disponen de alternativas viables para trasladar sus residuos sólidos fuera de dichos espacios.

*Tabla 18. Distancia a zonas protegidas*

Criterio	Relleno grande o mediano con equipo mecánico o relleno manual
	Valor acordado
El sitio se encuentra afuera de una zona protegida; la más cercana zona protegida está en una distancia de 1 km o más	0,7
El sitio se encuentra afuera de una zona protegida; la más cercana zona protegida está en una distancia de menos de 1 km	0,3
El sitio se encuentra adyacente de una zona protegida	0,1
El sitio se encuentra adentro de una zona protegida	0

*Fuente: Guía construcción [40].*

#### **2.5.2.4 Impacto estético al paisaje**

Se mide el impacto que la construcción del relleno sanitario tiene sobre el paisaje, comparando el paisaje con relleno con el paisaje sin relleno.

*Tabla 19. Impacto Estético al Paisaje*

Criterio	Relleno grande o mediano con equipo mecánico o relleno manual
	Valor acordado
El sitio se encuentra en un paisaje previamente alterado (uso industrial, excavación de yacimientos, área militar abandonado etc.)	0,4
El sitio se encuentra en un paisaje natural pero que no es diferente de los alrededores.	0,2
El sitio se encuentra en un lugar de interés especial (formaciones geológicas interesantes, vista panorámica, paisaje extremadamente hermoso etc.)	0

*Fuente: Guía construcción [40].*

#### **2.5.3 Destrucción de la capa vegetal existente**

Este criterio se refiere a la capa vegetal existente que se debe remover para poder construir el relleno sanitario.

*Tabla 20. Destrucción de la Capa Vegetal Existente*

Criterio	Relleno grande o mediano con equipo mecánico o relleno manual
	Valor acordado
No existe capa vegetal; el sitio se encuentra en un terreno árido o la capa vegetal ha sido removido por uso anterior	0,9

Existe una capa vegetal de menor importancia (pasto, montos), no hay especies endémicas en el sitio	0,7
La capa vegetal consiste en bosque secundario, pero no es endémica en el sitio	0,3
Existen plantas endémicas de la región en el sitio	0
La capa vegetal consiste en bosque primario	

Fuente: Guía construcción [40].

#### 2.5.4 Impacto estético al paisaje

El impacto visual posterior al cierre técnico del relleno sanitario es muy importante debido a que efecto es de carácter permanente. Dado que se debe considerar que el cierre técnico se integra de manera armoniosa con el entorno paisajístico.

Tabla 21. Impacto Estético al Paisaje

Criterio	Relleno grande o mediano con equipo mecánico o relleno manual	Valor acordado
El sitio se encuentra en un paisaje previamente alterado (uso industrial, excavación de yacimientos, área militar abandonado etc.)		0,4
El sitio se encuentra en un paisaje natural pero que no es diferente de los alrededores.		0,2
El sitio se encuentra en un lugar de interés especial (formaciones geológicas interesantes, vista panorámica, paisaje extremadamente hermoso etc.).		0

Fuente: Guía construcción [40].

#### 2.6 Biogás generado en el relleno sanitario

El biogás se genera a partir de la descomposición de biomasa, como residuos orgánicos, estiércol, restos de alimentos y subproductos agrícolas, mediante un proceso de digestión anaerobia facilitado por microorganismos en ausencia de oxígeno. Su composición principal incluye metano ( $\text{CH}_4$ ) en proporciones que oscilan entre el 55 y 70 %, dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) entre el 30 y 45 %, y sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ) entre el 1 y 3 %, además de otros compuestos en menor proporción. La proporción de estos gases varía en función de factores como la naturaleza de los sustratos utilizados, las condiciones operativas del sistema de digestión, el tiempo de retención hidráulica en el biodigestor, entre otros [41,42].

De todos los componentes gaseosos, el metano ( $\text{CH}_4$ ) es el más relevante desde el punto de vista energético, debido a su alto poder calorífico, lo que lo convierte en una fuente viable de energía renovable. En contraste, el  $\text{H}_2\text{S}$  es un gas altamente tóxico y corrosivo,

responsable del característico olor a huevo podrido. Este compuesto incoloro, inflamable y peligroso, puede provocar efectos adversos en la salud humana como pérdida de conciencia, irritación ocular, cefaleas, dificultades respiratorias y alteraciones en el sistema nervioso central y cardiovascular.

A nivel global, se estima que cada año se generan más de 105 mil millones de toneladas de residuos orgánicos, cuya descomposición libera metano y otros gases de efecto invernadero (GEI), contribuyendo significativamente al cambio climático. Si estos residuos fueran gestionados adecuadamente mediante procesos de valorización como la digestión anaerobia, se podrían reducir las emisiones de GEI hasta en un 50 % y cubrir aproximadamente el 20 % del compromiso global del Global Methane Pledge establecido para 2030. No obstante, actualmente solo el 2 % de estos residuos recibe un tratamiento adecuado. El uso del biogás representa una estrategia de desarrollo sostenible altamente eficaz, ya que contribuye simultáneamente al tratamiento de residuos, al acceso a fuentes energéticas limpias, a la mejora de la salud pública y al aumento de la productividad en el sector agrícola [43,44]

### **2.6.1 Composición del biogás generado en un relleno sanitario RSU**

Como resultado de la descomposición anaerobia de los componentes biodegradables de los residuos orgánicos en los RSU, se genera un gas como amoníaco ( $\text{NH}_3$  ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), monóxido de carbono (CO), hidrógeno ( $\text{H}_2$ ), sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), nitrógeno ( $\text{N}_2$ ) y oxígeno ( $\text{O}_2$ ), donde el metano y el dióxido de carbono son los principales gases [45–47].

La concentración del biogás depende de la antigüedad del relleno sanitario y de las características propias de los residuos. Por lo que es importante realizar anualmente la caracterización de los RSU, para conocer el volumen de biogás aprovechable a continuación, se detalla el porcentaje típico de distribución de biogás [48,49].

*Tabla 22. Composición de biogás generado en un relleno sanitario RSU*

Parámetro	Concentración %
Metano ( $\text{CH}_4$ ),	50-70
Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ )	35-55
Nitrógeno ( $\text{N}_2$ )	2-5
Oxígeno ( $\text{O}_2$ )	0.1-1
Sulfuros, disulfuros, mercaptanos, otros.	0-1.0
Amoníaco ( $\text{NH}_3$ ),	0.1-1

Hidrógeno ( $H_2$ )	0-0,2
Monóxido de carbono (CO),	0-0,2
Temperatura °C	10-40
Contenido de humedad (% humedad relativa)	0-100
Masa Kg/m <sup>3</sup>	1,1-1,28
Nivel de energía mínimo (MJ/Nm <sup>3</sup> )	10,8-23,3

Fuente: Análisis de biogás [23,45]

## 2.6.2 Proceso de obtención del biogás

El biogás se obtiene mediante dos procesos:

1. Digestión aerobia de microorganismos.
2. Digestión anaerobia de sustratos orgánicos.

### 2.6.2.1 Digestión aerobia de microorganismos

Es aquella fase en la cual el oxígeno que está presente en el aire contenido en los intersticios de la masa de residuos enterrados es consumido rápidamente.

### 2.6.2.2 Digestión anaerobia de microrganismos

La digestión anaerobia es un proceso bioquímico que consiste en la descomposición de la materia orgánica presente en los sustratos en ausencia de oxígeno, mediante la acción de diversos microorganismos. Durante este proceso, se degradan compuestos orgánicos complejos, como azúcares, celulosa, hemicelulosa, proteínas y lignina, los cuales se transforman progresivamente en fracciones más simples. Como resultado, se genera biogás, una mezcla rica en metano ( $CH_4$ ) y dióxido de carbono ( $CO_2$ ) [18–20]. A continuación, se describen las reacciones catabólicas que intervienen en la conversión de la materia orgánica en biogás durante la digestión anaerobia.

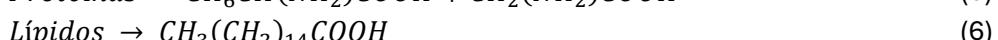
#### a) Reacciones de desintegración



Inertes

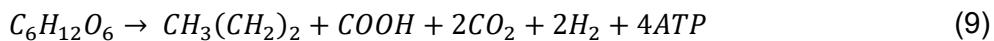
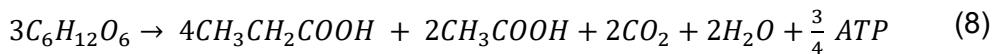
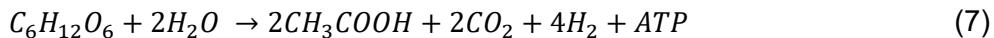
#### b) Reacciones de hidrólisis

(4)



c) Reacciones de acidogénesis:

Acidogénesis de la glucosa:



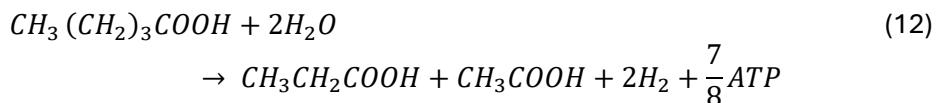
Acidogénesis de los aminoácidos:



Acidogénesis del ácido palmítico:

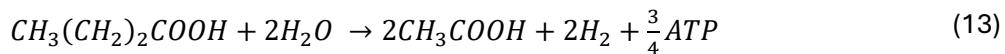


Acidogénesis del ácido valérico:



d) Reacciones de acetogénesis

a. Acetogénesis del ácido butírico:



b. Acetogénesis del ácido propiónico:



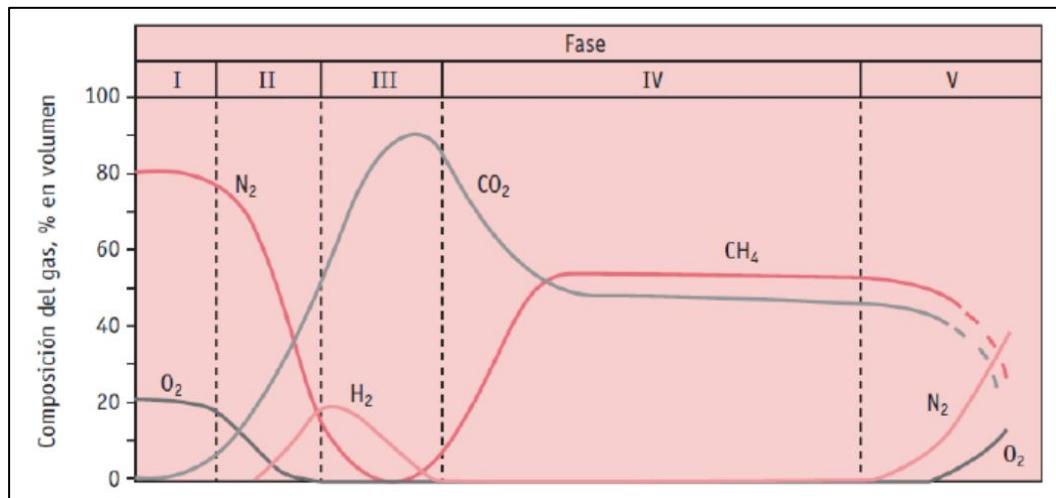
e) Reacciones de metanogénesis



### 2.6.3 Fases de la generación de biogás

La descomposición de los residuos orgánicos se produce en cinco fases, determinadas por las condiciones ambientales, tales como la temperatura, la presencia de oxígeno, las características del residuo y la antigüedad del relleno sanitario. De este modo, es posible identificar cinco fases a lo largo del proceso [21].

Figura 3. Fases de descomposición de los residuos sólidos y generación de biogás [50].



Fuente: Fases del proceso de formación de biogás en un depósito controlado (Carreras y Dorronsoro).

1. **Fase I. Aeróbica:** Inicia inmediatamente después de la disposición de los residuos sólidos en el relleno sanitario y en la que las sustancias fácilmente biodegradables se descomponen por la presencia de oxígeno y se propicia la formación de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), agua, materia parcialmente descompuesta registrando temperaturas entre 35 y 40 °C [51].
2. **Fase II. Descomposición anóxica:** no metanogénica: Ocurre el proceso de fermentación, actúan los organismos facultativos con la producción de ácidos orgánicos y la reduce significativamente el pH, condiciones propicias para la liberación de metales en el agua y la generación de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ).
3. **Fase III. Anaeróbica Metanogénica inestable:** Resultado de la acción de organismos formadores de metano ( $\text{CH}_4$ ), que, en las condiciones adecuadas, actúan lenta y eficientemente en la producción de este gas mientras reducen la generación de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ).
4. **Fase IV. Metanogénica:** Registra la más alta producción de metano oscilando entre 40-60% de metano ( $\text{CH}_2$ ) en volumen.
5. **Fase V. Estabilización:** La producción de metano ( $\text{CH}_4$ ) comienza a disminuir y la presencia de aire atmosférico introduce condiciones aeróbicas en el sistema.

*Tabla 23. Duración típica de las fases de generación de biogás en un relleno sanitario [52].*

Fase	Fase	Duración
I	Aeróbica	Horas a Semanas
II	Descomposición anóxica	1 a 6 Meses
III	Anaeróbica Metanogénica inestable	3 meses a 3 Años
IV	Metanogénica	8 a 40 Años
V	Estabilización	1 a 40 años
Total		10 a 80 Años

#### 2.6.4 Producción de biogás

El biogás generado en los rellenos sanitarios y en las plantas de tratamiento de lixiviados es una mezcla de gases, producto de un proceso bioquímico llevado a cabo por la acción de microorganismos, como resultado de la descomposición de la materia orgánica [25,26]. Este proceso ocurre mediante la digestión aerobia y anaerobia, donde la composición de los gases depende de la naturaleza y antigüedad de los residuos sólidos urbanos (RSU) depositados en el relleno sanitario. Así mismo, el funcionamiento del proceso depende del sustrato utilizado, de modo que el principal componente del biogás es el metano ( $\text{CH}_4$ ), seguido por dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y otros gases. La eficiencia en la generación de estos gases depende del desempeño de los microorganismos [18]. A continuación, se detalla la composición del biogás en función del sustrato.

*Tabla 24. Componentes del biogás en función del substrato utilizado [53]*

Parámetro	Residuos orgánicos	Planta de Tratamiento agua	Residuos	Propiedad
Metano	50-80 %	50-80 %	50-70 %	Combustible
Dióxido de carbono	30-50 %	20-50 %	30-50 %	Asfixiantes
Agua	Saturado	Saturado	Saturado	Combustible
Hidrógeno	0-2%	0-5%	0-2%	
Sulfuro de hidrógeno	100-700 ppm	0-1 %	0-8 %	Olor, tóxico
Amoníaco	Trazas	Trazas	Trazas	Olor, penetrante y corrosivo
Monóxido de carbono	0-1%	0-1%	0-1%	Tóxico
Nitrógeno	0-1%	0-3%	0-1%	Inerte
Oxígeno	0-1%	0-1%	0-1%	Corrosivo
Compuestos orgánicos	Trazas	Trazas	Trazas	Tóxicos

## 2.6.5 Fuentes de generación de biogás

Dado que el biogás es un gas combustible que se genera a partir de las reacciones de degradación de la materia orgánica (biomasa) mediante la acción de microorganismos, es posible identificar diversas fuentes a partir de las cuales se produce dicho gas [49,54].

*Tabla 25. Fuente de generación de biogás*

Fuente	VARIABLES	Fuente
	Humedad	
Excretas de ganado, caballo, cerdo y gallinaza para la generación de biogás	Sólidos totales o masa seca Sólidos volátiles (SV) Sólidos fijos (SF) Relación carbono/nitrógeno C/N. El intervalo óptimo de la relación C/N para procesos de transformación biológica está comprendido entre 20 y 35.	[55]
Fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU)	Cuando la materia orgánica contenida en los RSU se utiliza como substrato de la fermentación anaeróbica, el proceso se denomina biometanización o biogasificación. En este proceso, la materia orgánica se transforma en biogás y en una fracción sólida más pobre que el compost, que también puede utilizarse como mejorador de suelo.	[56]
Lodos o fangos de depuración de aguas residuales urbanas	Estos lodos, ricos en nutrientes (N, P y K), están constituidos, en algunos casos, por más del 60% de materia orgánica.	[57]
Aguas residuales de la industria alimentaria	Las aguas residuales industriales con elevada carga orgánica son susceptibles de ser utilizadas como substrato para la digestión anaeróbica.	[50]
Residuos agrícolas y ganaderos	La producción de grandes volúmenes de residuos orgánicos. Los purines están constituidos principalmente por materia orgánica (65-75% en base seca), nitrógeno (4-6% medidos como nitrógeno elemental), fósforo (3,5-5,5% en términos de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ), potasio (2,5-4 % como K <sub>2</sub> O), magnesio (0,5-1,5%) y calcio (3,5-4 %).	[58]
Residuos orgánicos industriales	Los residuos sólidos, la concentración de sustancias orgánicas solubles en las aguas residuales se reduce y aquellos pueden emplearse con mayor facilidad como subproductos, alimentos o combustible.	[59]

Así pues, la producción de biogás depende en gran medida de los residuos orgánicos [25], los cuales son fundamentales tanto para su generación como para su aprovechamiento energético como fuente de energía eléctrica. El biogás presenta un poder calorífico inferior (PCI) asociado a un contenido de metano (CH<sub>4</sub>) del 60 %, lo que equivale a 5.500 kcal/Nm<sup>3</sup>. El PCI del metano puro es de 13.187 kcal/kg, y su densidad es de 0,67 kg/m<sup>3</sup>; por tanto, el PCI expresado en volumen es de 8.835,29 kcal/Nm<sup>3</sup>. Esto implica que la producción media de energía eléctrica bruta por metro cúbico de biogás es de 2,07 kWh, mientras que la

producción calorífica media (PC) alcanza los 2,67 kWh [33]. En la Tabla 27 se muestra la producción de biogás en función del sustrato.

*Tabla 26. Producción de biogás en función del substrato utilizado (Coombs, 1990) [56,60].*

Tipo de Residuos	Contenido Orgánico	Sólidos volátiles (%)	Producción de biogás (m <sup>3</sup> /ton)
Orgánicos	Hidratos de carbono, lípidos y proteínas	20-30	150-240
Lodos residuales	Hidratos de carbono, lípidos y proteínas	3-4	17-22
Lodos residuales concentrados	Hidratos de carbono, lípidos y proteínas	15-20	85-110

## 2.6.6 Factores que afectan la producción de biogás

Dado que un relleno sanitario se comporta como un digestor anaerobio, es fundamental controlar los factores físicos y químicos que condicionan el proceso anaerobio. Entre estos factores se encuentran los nutrientes, la temperatura, el pH, el contenido de sólidos, el tiempo de residencia y la presencia de compuestos inhibidores del proceso [21,35].

*Tabla 27. Factores que afectan la generación de biogás en un relleno sanitario*

Factor	Descripción	Fuente
Composición de los residuos	La generación de biogás depende del porcentaje de residuos orgánicos sobre el total, además del tipo de desecho orgánico, pues estos son la fuente de producción de biogás.	[18]
Densidad de residuos	Transporte de nutrientes y humedad en el relleno, la presencia de partículas pequeñas favorece el transporte, aumenta la tasa de formación de biogás.	[61]
Temperatura	El rango óptimo para la existencia de bacterias anaeróbicas es de 30°C a 41°C. En rellenos sanitarios con temperaturas bajo los 10°C no permiten el crecimiento de los microorganismos.	[62]
Humedad	El contenido óptimo de humedad para la producción de biogás es de 50% a 60%. Dado que generación de biogás se incrementa con la humedad. sin embargo, altos contenidos crean un problema inundando las chimeneas.	
pH	El pH óptimo durante es entre 6,5 a 8,0, cuando existen condiciones de pH neutro.	[44]
Nutrientes	El ecosistema anaeróbico necesita de una serie de nutrientes, entre los que destacan el nitrógeno y fósforo.	
Condiciones atmosféricas	Las precipitaciones son la mayor fuente de humedad para un relleno sanitario, que además de contribuir a la producción de biogás, favorecen la “impermeabilización” del terreno impidiendo el ingreso de aire por grietas.	
Cobertura diaria de Residuos	El recubrimiento diario tiene una serie de efectos en el relleno sanitario, dado que evita el contacto de los desechos con el oxígeno, permitiendo que se consigan condiciones anaeróbicas, además reduce la entrada de aguas lluvias. Se recomienda un	[56]

	espesor de 0,15 a 0,20 m. compactados de tierra entre los niveles de celdas y de 0,60 m. de tierra en la capa fina.
Edad de los residuos	La generación de biogás es significativa durante 10 a 20 años. Los rellenos sanitarios con varias décadas tienen una producción baja de biogás.

Así mismo, se detallan los factores que afectan el proceso de digestión anaeróbica en una planta de tratamiento de lixiviados y aguas residuales con lodos, como se indica en la Tabla 29.

*Tabla 28. Factores que afectan el proceso de la digestión anaeróbica en lodos*

Factor	Descripción	Fuente
Temperatura	<p>Se lleva a cabo en tres intervalos diferentes el intervalo mesofílico es el más utilizado, termofílico donde se genera mayor producción de biogás. Debido a la mayor sensibilidad que presentan las bacterias termofílicas a las variaciones térmicas, lo que conlleva a un mayor control del sistema.</p> <p>Bacterias Psicrofílicas con un rango de temperatura (Menos de 20°C, sensibilidad <math>\pm 2^{\circ}\text{C}/\text{hora}</math>).</p> <p>Bacterias Mesofílicas (entre 20 y 40 °C, sensibilidad <math>\pm 1^{\circ}\text{C}/\text{hora}</math>)</p> <p>Bacterias Termofílicas.</p> <p>En el caso del tratamiento anaerobio de lodos, la temperatura del proceso determina la rapidez y el grado de avance de la digestión anaerobia.</p>	[63]
Nutrición	Los principales nutrientes del sistema anaerobio son nitrógeno, sulfuro, fósforo, hierro, cobalto, níquel, molibdeno, selenio, riboflavina y vitamina B12 (Speece, 1987). Los valores mínimos necesarios para el correcto crecimiento de los microorganismos es el nitrógeno y fósforo en función de la concentración de carbono de la alimentación, considerándose que la relación C/N debe oscilar entre 15-30:1, y la C/P de 75-113/1.	[44]
Potencial redox	Es un indicador del carácter oxidante o reductor del proceso. Este parámetro debe ser suficientemente bajo para poder asegurar el desarrollo de las poblaciones metanogénicas. En cultivos puros las bacterias metanogénicas requieren un potencial redox entre -300 mV y -320 mV	[64]
pH y alcalinidad	Los microorganismos anaerobios necesitan un pH en torno a la neutralidad para su correcto desarrollo, aunque permiten cierta oscilación, pero pueden aparecer problemas si cae por debajo de 6 o sube por encima de 8.3.	[58]
Tiempo de retención	El crecimiento de los microorganismos es mientras mayor sea el tiempo de retención mayo producción de biogás por unidad de materia orgánica introducida, y mayor grado de eliminación de materia orgánica se obtendrá, la producción diaria disminuirá una vez superado el óptimo.	[64]
Carga orgánica	La velocidad de carga orgánica es la cantidad de materia orgánica introducida diariamente, los valores normales para residuos ganaderos y fracción orgánica de los residuos sólidos están entre 2 y 4 g SV/Ld.	[65]

## 2.6.7 Propiedades del biogás

Los principales componentes del biogás, según su fuente de generación, son el metano y el dióxido de carbono. Los límites de inflamabilidad del metano se encuentran entre un 5

% y un 15 % de concentración en el aire, mientras que para el biogás estos valores suelen abarcar entre un 11 % y un 21 %. A continuación, se describen las propiedades fisicoquímicas del biogás a una temperatura de 20 °C [37,66].

*Tabla 29. Propiedades del biogás a 20 °C [7]*

Propiedad	Valor
Densidad relativa (c/r al aire).	1,022
Densidad absoluta (kg/m <sup>3</sup> ).	1,202
Poder calorífico superior (kcal/m <sup>3</sup> ).	5,500
Poder calorífico inferior (kcal/m <sup>3</sup> ).	4,700

## 2.7 Planta de biogás

El biogás generado en un relleno sanitario debe someterse a un tratamiento previo antes de su transformación en electricidad, el cual se detalla a continuación.

1. Remover el ácido sulfídrico (H<sub>2</sub>S) dado que pueden causar daños al equipo y son altamente contaminantes para el medio ambiente, causante de lluvia ácida.
2. Ingreso del gas depurado al generador eléctrico para producir electricidad.
3. Cambio de voltaje
4. Líneas de red para su distribución a los hogares.

Por lo tanto, la selección del método de purificación del biogás resulta fundamental para lograr un aprovechamiento óptimo del recurso. En este contexto, la industria ha desarrollado diversas tecnologías para su tratamiento.

*Tabla 30. Método de purificación de biogás[67,68]*

Tratamiento	Costo de inversión	Costo de operación	Ventajas	Desventaja
Adsorción con carbón activado, silicagel o tamices moleculares	Bajo	Alto	Concentración de 95 % de CH <sub>4</sub>	Humedad puede afectar el proceso. Requiere de quema del llamado “gas de cola”.
Absorción con compuestos de hierro	Bajo	Bajo	Opera a diferentes presiones, remueve CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S y vapor de Agua,	Eficiencia depende del compuesto químico seleccionado.

Absorción con compuestos orgánicos	Medio	Alto	Uso de solución de aminas, que favorecen la eliminación de CO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> S.	Producción de biogás de cantidades mayores o iguales a 15.000 m <sup>3</sup> /día.
Filtración con membranas	Alto	Alto	Uso de membranas poliméricas no rugosas para eliminar CO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> S.	Requiere de múltiples etapas, aplicación en grandes escalas y de elevados costos de instalación y operación.
Biológicos	Bajo	Medio	De menor impacto ambiental debido al uso de microorganismos	Requiere de elevados tiempos de operación y de exactitud en las concentraciones de H <sub>2</sub> S

## 2.8 Valorización energética de biogás

Considerando que en el Ecuador la generación de residuos sólidos urbanos (RSU) por regiones en el 2022 fue de 7.289,71 toneladas por día en la región Costa, 5.996,14 toneladas por día en la Sierra, 673,45 toneladas por día en el Oriente y 21,77 toneladas por día en la región Insular. De este total, el 52 % corresponde a la región Costa, el 43 % a la región Sierra y el 5 % a la región Insular. Por otro lado, el Sistema Nacional Interconectado (S.N.I.), contó con el aporte de generación de energía de las siguientes centrales por tipo de tecnología: hidroeléctricas 24,624 GWh (85,3%), térmicas 3.758 GWh (13%), biomasa 348 GWh (1,2%), solar fotovoltaica 33 GWh (0,12%), biogás 42 GWh (0,14%) y eólicas 57,89 GWh (0,20%). De ahí que el Plan maestro de electricidad del Ecuador establece que para el 2032, la cobertura eléctrica alcanzará un 97,64 % [20,69].

Lo que constituyen una parte importante la emisión de gases generados por la descomposición de los residuos sólidos en los rellenos sanitarios, mismos que pueden ser aprovechados transformándolo en energía, mediante la utilización de tecnologías reduciendo el consumo de los combustibles fósiles [54,70]. De ahí que la valorización energética es el procedimiento que permite el aprovechamiento de las emisiones generadas por la descomposición de los residuos sólidos en los rellenos sanitarios minimizando el peligro para la salud humana así como para el ambiente [71,72]. De ahí que la jerarquización de los RSU es clave para el aprovechamiento de los residuos como se muestra en la figura 4.

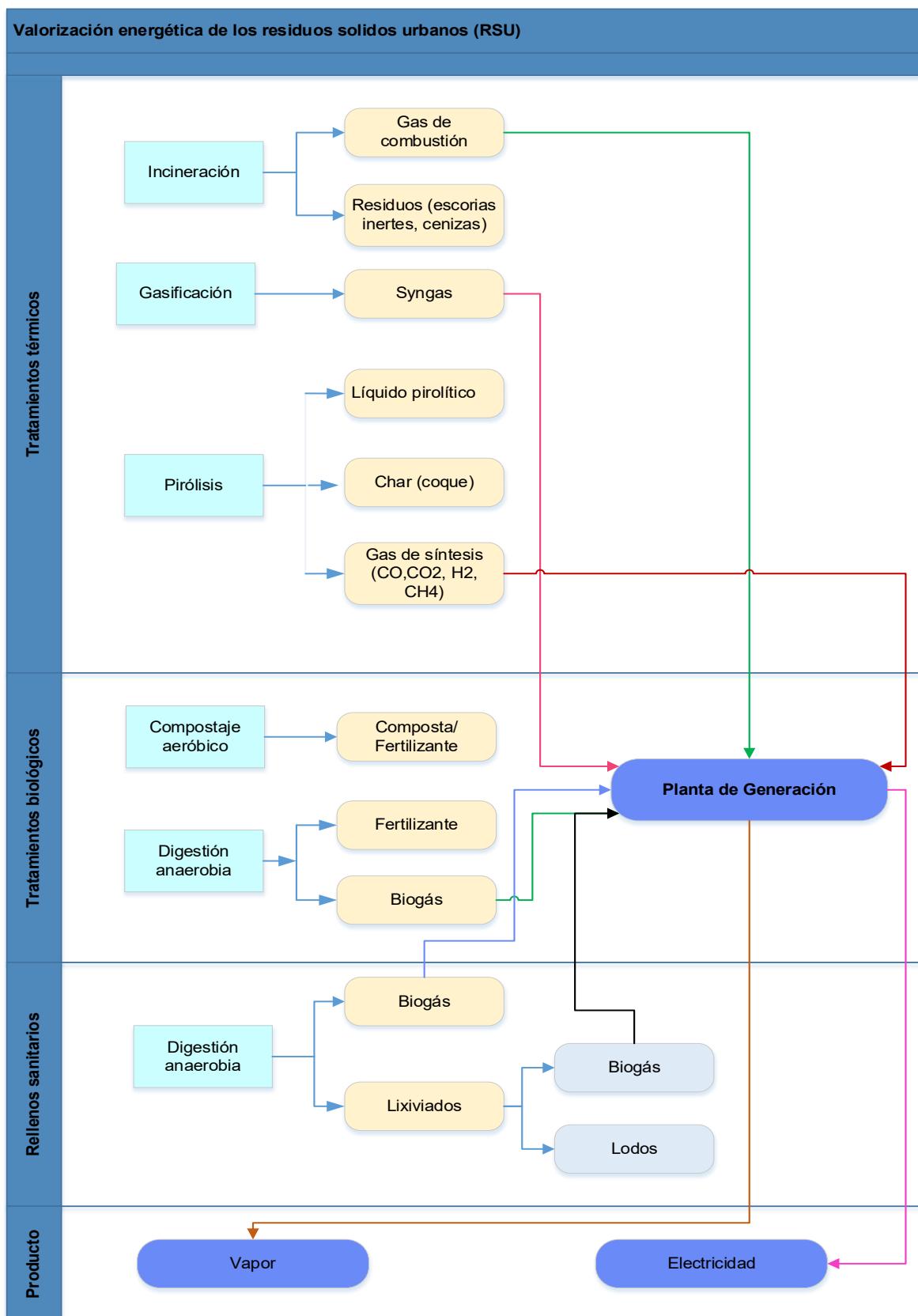
*Figura 4. Jerarquización de los residuos RSU*



*Fuente: Reglamento General a la Ley Orgánica de Economía Circular Inclusiva, 2023.*

Por ende, la valorización energética de los residuos se puede categorizar en tres tipos de tratamientos como se muestra en la figura 5.

Figura 5. Valorización energética del biogás [71]



### **2.8.1 Valor calorífico del biogás**

El valor calorífico del biogás es inflamable cuando el contenido de metano es superior al 45%. De ahí que el valor calorífico del biogás varía entre 18,8 y 23 MJ/m<sup>3</sup> para contenidos de metano de 50%. El poder calorífico del biogás depende del contenido y del tratamiento que se realice al biogás [11,12,47]. El valor calorífico del biogás es 6 kWh/m<sup>3</sup>, 700 °C y presenta un contenido de oxígeno para explosión un volumen % 6-12,2 [6,42,73].

### **2.8.2 Potencial energético de RSU**

Para la valorización energética de los RSU es importante conocer los siguientes parámetros.

1. Humedad
2. Composición de los (RSU)
3. Poder calorífico inferior (PCI)
4. Potencial energético

Así mismo para calcular el poder calorífico (PC) de los residuos, se debe conocer la composición de los residuos que ingresan al relleno sanitario. Se debe conocer además la densidad media o peso específico de los RSU y el peso volumétrico del residuo a través de la siguiente formula.

$$PV = \frac{P}{V} \quad (17)$$

Dónde:

PV = Peso volumétrico del residuo sólido, en kg/m<sup>3</sup>.

P = Peso de los residuos sólidos (peso bruto menos recipiente), en kg.

V = Volumen del recipiente, en m<sup>3</sup>.

De ahí que el PCI es la cantidad de calor que genera un kilogramo o un metro cúbico de combustible al oxidarse completamente y se mide en kcal/kg; kcal/m<sup>3</sup>. El poder calorífico se divide en poder calorífico superior (PCS) y poder calórico inferior (PCI) [38,74,75]. De ahí que para calcular el PCS y PCI, se debe calcular el porcentaje de humedad mediante la siguiente formula.

$$\% H = \left[ \frac{(a - b)}{a} \right] * 100 \quad (18)$$

Dónde:

a: Peso húmedo

b: Peso seco

Se calcula además el porcentaje de cenizas a través de la siguiente ecuación.

$$\% C = \frac{a}{b} * 100 \quad (19)$$

Donde:

a: Peso cenizas

b: Peso inicial 105 °C muestra seca

Para calcular la PCS se utiliza la siguiente ecuación.

$$PCS = (tW - e1 - e2 - e3)m \quad (20)$$

Donde:

PCS = calor de combustión (cal/g).

t = aumento de temperatura (°C).

W = constante del equipo (cal / °C).

m = masa de la muestra (g).

e1 = corrección en calorías por el calor de formación de ácido nítrico.

e2 = corrección en calorías para el calor de formación de ácido sulfúrico.

e3 = corrección en calorías por el calor de combustión del cable de ignición

El cálculo del PCI se obtiene a través de la siguiente ecuación [12,13,48].

$$PCI = PCS - \% H100 * 600 \quad (21)$$

Donde:

PCS = poder calórico superior (cal / g).

PCI = poder calórico inferior (cal / g).

% H = % humedad.

Se calcula además el PCI, es necesario conocerlo para determinar la potencia es necesario conocer además los porcentajes de C, H, O y azufre de los residuos sólidos.

$$PCI = 8,140 * \frac{C}{29,000} * \left( H - \frac{O}{8} \right) + 2,200 * S \quad (22)$$

Donde,

C= Cantidad centesimal de carbono en peso por kg de combustible

H= Cantidad centesimal de hidrógeno en peso por kg combustible

O= Cantidad centesimal de oxígeno en peso por kg combustible

S=Cantidad centesimal de azufre en peso por kg combustible

$$Base_{seca} = Base_{humedad} * (100 \% - \%_{humedad}) \quad (23)$$

$$Cantidad_{RSU_{elemento}} = \frac{Base_{seca} * Cantidad_{elemento\ RSU}}{100} \quad (24)$$

El poder calorífico inferior del biogás se calcula además de la siguiente forma.

$$PCI_{biogás} = PCI_{CH_4} * \% CH_4 \quad (25)$$

Donde:

$PCI_{CH_4}$ =Poder Calorífico del Metano (9,94 kWh/Nm<sup>3</sup>)

$\%CH_4$  = Porcentaje de metano en el Biogás

Potencia generada disponible:

$$Potencia\ generada = Caudal_{biogás} * PCI_{biogás} \quad (26)$$

Donde:

$Caudal_{biogás}$ = Biogás mínimo recuperado

Por otro lado, el potencial energético y determinar la generación de energía eléctrica del biogás de los RSU, se calcula a través de la siguiente ecuación [47].

$$Potechnial\ energético \left( \frac{MJ}{Ton\ RSU} \right) = \sum PCI \left( \frac{MJ}{Ton} \right) * Composición\ (%) \quad (27)$$

Donde:

PCI = Poder calorífico inferior

Composición = Porcentaje en peso del material

Ton = Toneladas

### 2.8.3 Potencia eléctrica

Para calcular la potencia eléctrica se aplica la siguiente ecuación [76].

$$Potencia\ Eléctrica = Potencia\ generada * Eficiencia \quad (28)$$

De ahí que para estimar la producción de energía a partir del biogás se debe considerar los siguientes criterios:

1. Potencia disponible

$$Potencia\ disponible\ [kW] = \eta_t * PCI_{biogás} * Q_{biogás} \quad (29)$$

Donde:

$\eta_t$ = Rendimiento térmico de generación eléctrica (%)

$PCI_{biogás}$  = Poder calorífico inferior del biogás

$$Q_{biogás} = \text{Caudal de biogás capturado (m}^3/\text{h})$$

2. Energía eléctrica producida se estima en función de la potencia disponible y un factor disponibilidad de 85 % por mantenimiento realizado.
3. Electricidad

$$\begin{aligned} & \text{Electricidad [kWh/año]} && (30) \\ & = (\text{potencia disponible}) * 0.85 * \text{horas de funcionamiento año} \end{aligned}$$

## 2.9 Métodos de estimación de producción de biogás

Para determinar la cantidad de biogás que se produce en un relleno sanitario, es posible emplear dos métodos principales:

Medición directa en campo: Equipos analizadores de gases in situ que cuente con sistemas de captación biogás.

Modelos teóricos que permiten estimar la producción de biogás. Actualmente existentes modelos de primer orden y segundo orden.

### 2.9.1 Modelos teóricos para estimar la producción de biogás

Los modelos teóricos se utilizan para estimar las tasas de emisión de biogás y, de esta forma, evaluar la viabilidad técnica y económica en la planificación de proyectos energéticos [27]. A continuación, se detallan los modelos teóricos más comúnmente aplicados.

1. Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos EPA EE. UU.
2. Modelo de emisiones de gas de vertedero (LandGEM, versión 3.1) año 2023.
3. Modelo Mexicano de Biogás versión 2.0.
4. Modelo Ecuatoriano.
5. Modelo Colombiano de biogás
6. Modelo Centroamericano de biogás.
7. Modelo del Panel Intergubernamental de Cambio Climático IPCC 2006.
8. Modelo GasSim de la Agencia Medioambiental del Reino Unido (UK EA).
9. Modelo SWANA (asociación de residuos sólidos de Norteamérica).
10. Modelo Scholl Canyon.
11. Balance estequiométrico

De todos estos modelos, los más utilizados son el modelo del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), el modelo Landfill Gas Emission Model (LandGEM), y el modelo colombiano, aprobado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA), basado en LandGEM. Algunos modelos, como GasSim, emplean aproximaciones estadísticas y el método de Montecarlo para estimar la producción de metano.

Tabla 31. Modelos teóricos para estimar la producción de biogás

Modelo	Descripción	Ecuaciones	Fuente
LandGEM 3.1	<p>Este modelo asume que el gas es aproximadamente la mitad CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>. Los índices de emisión en un relleno sanitario pueden verse afectados por lo siguiente:</p> <p>Capacidad de diseño de residuos del relleno sanitario,</p> <p>Cantidad de residuos en el relleno sanitario.</p> <p>Tasa de generación de metano (k),</p> <p>Potencial capacidad de generación de metano (L<sub>0</sub>),</p> <p>Número de años del relleno sanitario.</p> <p>Resultado:</p> <p>Producción CH<sub>4</sub> (m<sup>3</sup>/año).</p> <p>Producción CO<sub>2</sub> (m<sup>3</sup>/año).</p>	$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 k L_0 \left( \frac{M_i}{10} \right) e^{-kt_{ij}} \quad (31)$ <p>Donde:</p> <p><math>Q_{CH_4}</math> = generación anual de metano en el año de cálculo (m<sup>3</sup>/año).</p> <p>i= incrementos de 1 año</p> <p>n= (año del cálculo) – (año inicial en que se aceptó el residuo).</p> <p>j = tiempo de incremento de 0.1 años</p> <p>k = índice de generación de metano (1/año).</p> <p>L<sub>0</sub> = generación potencial de metano (m<sup>3</sup>/mg).</p> <p>M<sub>i</sub> = Masa de residuos depositados en el año i<sup>th</sup> (mg/año).</p> <p>t<sub>ij</sub> = edad de la sección j<sup>th</sup> de masa de residuos depositados en el año i<sup>th</sup> (años decimales).</p>	[26,32,77,78]
IPCC	Se basa en el método de descomposición de primer orden en donde el carbono se degrada formando metano.	$Emisiones CH_4 = [\sum_x CH_4 generado_{x,T} - R_T] (1 - OX_T) \quad (32)$ $DDOCm = W * DOC * DOCf * MCF \quad (33)$ <p>DDOCm= masa del carbono orgánico degradable disuelto.</p>	[79]
Modelo Mexicano	Es herramienta para la evaluación de la factibilidad y los beneficios potenciales al capturar y utilizar el biogás generado, el modelo considera lo siguiente:	$L_o = DDOCm * F * 16/12 \quad (34)$ $Q_{LFG} = \sum_{t=1}^n \sum_{j=0.1}^1 2k L_0 \left[ \frac{M_i}{10} \right] (e^{-kt_{ij}}) (MCF)(F) \quad (35)$	[81]

	<p>Cantidad de residuos depositados en el relleno sanitario anualmente.</p> <p>El año de apertura y clausura del sitio.</p> <p>El índice de generación de metano (k).</p> <p>La generación potencial de metano (<math>L_0</math>).</p> <p>El factor de corrección de metano (MCF).</p> <p>El factor de ajuste por incendios (F).</p> <p>La eficiencia de recuperación del sistema de captura [80].</p>	<p>Donde:</p> <p><math>Q_{LFG}</math> = Flujo de biogás máximo esperado (m<sup>3</sup> /año)</p> <p>i = Incremento en tiempo de 1 año</p> <p>n = (año del cálculo) – (año inicial de disposición de residuos)</p> <p>j = Incremento de tiempo en 0.1 años</p> <p>k = Índice de generación de metano (1/año)</p> <p><math>L_0</math> = Generación potencial de metano (m<sup>3</sup>/Mg)</p> <p><math>M_i</math> = Masa de residuos dispuestos en el año i (Mg)</p> <p><math>T_{ij}</math> = Edad de la sección j de la masa de residuos <math>M_i</math> dispuestas en el año i (años decimales)</p> <p>MCF = Factor de corrección de metano</p> <p>F = Factor de ajuste por incendios</p>
Modelo Ecuatoriano	Es una modificación del modelo mexicano, desarrollado por SCS Engineers en concordancia con la U.S. EPA en el año 2003.	$Q = \sum_{0 \%vol}^n \frac{1}{k} * M * L_0 * e^{-k(t-t_{lag})} \quad (36)$ <p>Donde:</p> <p><math>Q</math>: Cantidad total de biogás generado, [m<sup>3</sup>/año].</p> <p><math>n</math>: Número total de años modelado. %vol: Porcentaje volumétrico estimado de metano en el biogás del relleno.</p> <p><math>k</math>: Tasa de generación de metano, [1/año].</p> <p><math>M</math>: Cantidad de residuos dispuestos en el año <math>i</math> [ton].</p> <p><math>L_0</math>: Potencial de generación de metano, [m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>/ ton de RSU].</p> <p><math>t</math>: Tiempo en años, desde el inicio de la disposición de desechos.</p> <p><math>t_{lag}</math>: Tiempo estimado entre el depósito del desecho y la generación de metano.</p>
Modelo Colombiano	Se requiere que el usuario ingrese datos específicos tales como el año de apertura, año de clausura, índice de disposición anual, ubicación del sitio las condiciones físicas pasadas y presentes del sitio.	$Q_{LFG} = \sum_{t=1}^n \sum_{j=0.1}^1 2kL_0 \left[ \frac{M_i}{10} \right] (e^{-kt_{ij}}) (MCF)(F) \quad (37)$ <p>Donde:</p>

---

$Q_{LFG}$ : flujo de biogás máximo esperado [ $m^3/año$ ]

i: incremento en tiempo de 1 año

n: (año del cálculo) - (año inicial de disposición de residuos)

j: incremento de tiempo en 0,1 años

k: índice de generación de metano [ $\frac{1}{año}$ ];

$L_0$ : generación potencial de metano [ $\frac{m^3}{Mg}$ ];

$M_i$ : masa de residuos dispuestos en el año i [Mg];

$t_{ij}$ : edad de la sección j de la masa de residuos  $M_i$  dispuestos en el año i

MCF: factor de corrección de metano

F: factor de ajuste por incendios

---

$$C_t = C_0 [C_{0.1} * e^{(-k_1*t)} + C_{0.2} * e^{(-k_2*t)} + C_{0.3} * e^{(-k_3*t)}] \quad (38)$$

Donde:

$C_t$  = Masa de carbono degradable que se ha degradado o hasta el tiempo t.

$C_0$  = Masa de carbono degradable inicial.

$C_{0i}$  = Masa de carbono degradable inicial de la fracción de residuos i. El modelo divide todos los residuos en 3 fracciones en función de la velocidad con la que se degradan en las condiciones del vertedero: [76]

Degradación rápida.

Degradación moderada.

Degradación lenta.

$K_i$  = Constantes cinéticas de degradación para cada una de las fracciones.

$C_x$  = Masa de carbono degradada en el año de cálculo x.

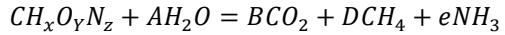
---

GasSim (UK)

El biogás se calcula a partir de la cantidad de residuos, de su composición, de la humedad que contiene y de la tasa de degradación. A partir de la cantidad y composición se determina la cantidad de carbono orgánico degradable.

Balance estequiométrico

1. Balance estequiométrico a partir de la composición de los residuos sólidos no peligrosos
2. Biodegradabilidad de los materiales



[42,75]

$$Ci = K * K' [Wt * (1 - Mi) * Vi] Pi$$

---

---

### 3. Modelo matemático ecuación de primer orden

Donde:

C<sub>i</sub>= Volumen de metano generado por el componente i (m<sup>3</sup>)

W<sub>t</sub>= Peso total del residuo en base húmeda (kg)

P<sub>i</sub>= Fracción del componente i, en base húmeda

M<sub>i</sub>= Contenido de humedad de la fracción del componente i.

V<sub>i</sub>= Fracción de los sólidos volátiles en base seca del componente i.

K= Constante (300 l/CH<sub>4</sub> de DOQ)

K<sub>1</sub> = Constante (1.5 Kg de DQO/Kg de sólidos volátiles)

$$C = \sum C_i \quad (39)$$

Donde:

C= Volumen total de biogás que producen todos los componentes i.

I=Indicador del componente respectivo

n= Número de componentes considerados

$$\frac{dG}{dt} = K_1 G \quad (40)$$

Donde:

t=Tiempo en años

G= Volumen del gas producido antes de tiempo t (m<sup>3</sup>)

K<sub>1</sub>= Constante de producción de gas en la primera etapa

$$\frac{dL}{dt} = -K_2 G \quad (41)$$

---

---

Donde

L= Volumen de gas producido después del tiempo t (m<sup>3</sup>)

K2= constante de producción de gas en la segunda etapa

$$G = (L_0/2) \exp \left[ -k_1 \left( \frac{t_1}{2} - t \right) \right] \quad (42)$$

$$L = (L_0/2) \exp [-k_2(t - t_1/2)]$$

Los valores típicos para t y las k1 y k2.

Tipo Residuo	t	K1	K2
Residuos de fácil degradación	1	3.91	1.56
Residuos moderamiento degradados	2	1.96	0.978
Residuos recalcitrantes	20	0.196	0.0978

---

## 2.10 Energía eléctrica a partir de biogás generado de los residuos sólidos urbanos

La transformación de energía mecánica a través de generadores como microturbinas, motores de combustión o turbinas de gas son utilizadas para la generación de biogás. Por consiguiente, para la selección de los equipos para la obtención de energía eléctrica se debe considerar lo siguiente.

*Tabla 32. Criterios para la selección del equipo transformador de energía eléctrica*

Equipo	Contenido mínimo CH <sub>4</sub>	Rendimiento	Rango Nm <sup>3</sup> biogás/h	Potencia generadora	Rango de flujo	Costo USD/kW
Microturbinas	35 %	15 al 33 %	< 169,8	30 kW-200 kW	<8 m <sup>3</sup> /min	5.500
Motores de combustión interna	40 %	33 al 37 %	255 a 8.493,6	800 kW-3MW	8-30 m <sup>3</sup> /min	1.150-1.700
Turbina de gas	40 %	30 al 35 %	6.795 a 33.975	>3MW	>40 m <sup>3</sup> /min	1.400

## 2.11 Sistema de extracción de biogás

En la actualidad, las emisiones de metano se han incrementado como consecuencia del crecimiento poblacional y del aumento del consumo [51]. Esto ha dado lugar a un incremento de las emisiones antropogénicas, por lo que, a través de tratados internacionales como el Protocolo de Kioto, se busca identificar y cuantificar las fuentes de generación, con el fin de aprovechar estos gases como combustibles. De ahí que para que un sitio de disposición final sea considerado como un relleno sanitario, debe cumplir con los siguientes requisitos:

1. Aislamiento hidrológico (de forma natural dada su ubicación o tipo de suelo, o por un revestimiento sintético).
2. Diseño formal de ingeniería.
3. Personal capacitado para un control permanente.
4. Disposición controlada de residuos (separar en capas, compactar y recubrir) [84].

De modo que los sistemas de extracción para el aprovechamiento del biogás dependen del tipo de residuo y del diseño del relleno sanitario, donde los gases pueden ser evacuados a través de drenaje [85]. A continuación, se describen los tipos de drenajes utilizados para el manejo del biogás.

*Tabla 33. Tipos drenajes para el manejo del biogás*

Tipo drenaje	Descripción	Fuente
Activo	<p>Consiste en la succión del gas mediante un soplador. Este tipo de drenajes se implementa en rellenos sanitarios mecanizados con una capacidad de recepción de más de 500 Ton/día.</p> <p>Para el manejo del biogás, se lo realiza a través de un conjunto de sistemas, como energético a la planta de producción o de aprovechamiento energético.</p> <p>Incluye la captación, conducción, succión, limpieza, quemado de excedentes y dosificación de biogás para su suministro a la planta generadora.</p> <p>Para la definición y características de estas etapas, debe identificarse las siguientes variables:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Producción de biogás</li> <li>▪ Horizonte de producción</li> <li>▪ Composición del biogás</li> <li>▪ Temperatura,</li> <li>▪ Presión y Flujo</li> </ul>	[86,87]
Pasivo Sin Chimeneas	<p>La capa superficial, se mezclan con el aire y se diluyen. Este sistema presenta algunos problemas.</p> <p>En las celdas ya terminadas, cubiertas y planteadas, se puede impedir el suministro de aire de las raíces por causa de la concentración alta de metano en la capa de tierra.</p> <p>Cuando existen fisuras en los taludes o la superficie del relleno, los gases se difunden por las fisuras sin pasar por el filtro biológico que constituye la capa de tierra.</p> <p>Si se descarga lodo o basura muy húmeda en el relleno, o si el relleno está expuesto a demasiada lluvia, se pierde el impacto de filtro biológico.</p> <p>Si se produce una cantidad muy alta de gas y por la superficie entera, hay demasiada carga al filtro biológico y el filtro pierde su eficiencia.</p> <p>En el Páramo o en la estación fría en la Sierra no accede suficiente oxígeno a los microorganismos en la capa de tierra y el filtro biológico no funciona adecuadamente.</p>	[88]
Pasivo Con Chimeneas	<p>El gas se difunde hacia la próxima chimenea y por ella de manera controlada hacia afuera. Las chimeneas tienen una alta permeabilidad para el gas y por consecuencia queda muy baja la cantidad de gas que no se difunde por la chimenea, pero por la superficie del cuerpo de basura sí. Las chimeneas de drenaje se pueden construir de dos maneras:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Jaula de malla con 4 puntales de madera, llenada con piedra bola o grava</li> <li>▪ Tubo perforado llenado con piedra bola o grava.</li> </ul>	[89]

De ahí que, al implementarse las chimeneas en el relleno sanitario, estas deben separarse a una distancia de 50 m, donde se puede instalar un sistema de bombeo y succión para el aprovechamiento del biogás. Sin embargo, los rellenos sanitarios de los cantones Francisco de Orellana, Loreto, Joya de los Sacha, Aguarico y Santa Cruz son de categoría pequeña, debido a que reciben aproximadamente entre 19 y 70 toneladas por día de residuos sólidos, por lo que no presentan las condiciones adecuadas para la generación energética [18,90].

### **2.11.1 El sistema de captación de biogás**

El sistema de captación permite el control de las emisiones de biogás y su migración a zonas aledañas al sistema de captación está conformado por los siguientes componentes.

1. Pozos de captación
2. Equipamiento de pozos
3. Mecanismos de control de flujos

Para el cálculo del número de pozos se deben considerar las dimensiones del sitio, el radio de influencia y la separación entre pozos. Basándose en las estimaciones obtenidas de diversas pruebas de producción de biogás, se considera un radio de influencia promedio entre 25 y 35 metros, lo cual, dividido entre el total del área de estudio, determinará el número total de pozos a construir [56]. En el sistema de captación, se debe instalar la cantidad estimada de pozos verticales en dos secciones interconectadas entre sí mediante una tubería de 18 pulgadas de diámetro, la cual conducirá el biogás hacia la planta de tratamiento y los generadores.

### **2.11.2 Sistema de conducción de biogás**

La tubería debe estar conformada por una línea de 4 pulgadas de diámetro, la cual conecta la mitad de los pozos al sistema. La siguiente sección de tubería tiene un diámetro de entre 6 y 14 pulgadas y se dispone a ambos lados del sistema, conforme al flujo de biogás. La tubería de 18 pulgadas transporta el flujo de gas hacia la planta de generación de energía [55]. El sistema de conducción está constituido por una red de tuberías de polietileno de alta densidad (PEAD), destinada a transportar el biogás desde los pozos de captación hasta la planta de extracción. El sistema de tuberías de conducción incluye lo siguiente:

1. Tubería de diámetros de 4, 6, 8, 10, 12, 14 y 18 pulgadas, los cuales conectan a los pozos.
2. Sub-cabezales que conectan a grupos de pozos.
3. Cabezales que transportan el biogás desde los sub-cabezales hasta la planta de extracción.

*Imagen 1. Tubería que conecta con los pozos para el transporte de biogás*



*Fuente: Relleno Sanitario Las Iguanas, 2021.*

De acuerdo con Castells, un sistema típico de recolección de gas en un relleno sanitario se compone de los siguientes componentes.

Pozos de recolección del biogás: consisten en una red de pozos verticales u horizontales (trincheras) instalados en las celdas de los residuos y sirven para colectar el biogás.

Red de tuberías (laterales y cabezales): tienen el fin de conectar el pozo de recolección a la antorcha o a la planta de energía. Generalmente son fabricadas con polietileno.

Trampas de condensado o cárcamos: es un sistema de eliminación de la humedad que contiene el biogás y que genera condensaciones, mismas que pueden taponar la tubería y con ello anular o reducir la efectividad de la red de captación.

Estación de quemado, con o sin planta de energía: al final del proceso debe contar con los elementos necesarios para que el biogás capturado se pueda quemar para evitar las emisiones de CH<sub>4</sub> a la atmósfera, se infiltre dentro del suelo o se pueda utilizar como combustible para generar electricidad.

*Imagen 2. Tubería y sub-cabezales para el sistema de captación de biogás*



*Fuente: Relleno Sanitario Las Iguanas, 2021.*

### 2.11.3 Sistema de Succión

El sistema de succión permite la extracción del biogás del relleno sanitario. El sistema activo de succión debe incluir los siguientes componentes:

1. Planta de extracción del biogás.
2. Sistema de control eléctrico o mecánico para la operación de la planta.

La planta de extracción incluye los componentes mecánicos y eléctricos del sistema que capta el biogás generado en el relleno sanitario. Los componentes principales de la planta de extracción se integran por los siguientes elementos:

1. Separador de condensados y tanque de almacenamiento con un sistema de bombeo.
1. Tubería y válvulas.
2. Medidores de la calidad y cantidad de gas.
3. Extractores.

A continuación, se presenta la planta de extracción de biogás, así como el sistema de aprovechamiento implementado en el relleno sanitario de Pichacay, en el cantón Cuenca.

*Imagen 3. Tubería y válvula de conducción de biogás relleno sanitario de Pichacay*



*Fuente: Relleno Sanitario de Pichacay, 2021*

*Imagen 4. Medidor de conducción de biogás en operación relleno sanitario de Pichacay*



*Fuente: Relleno Sanitario de Pichacay, 2021*

# **CAPÍTULO 3.**

# **METODOLOGÍA DE LA**

# **INVESTIGACIÓN**

---

### **3 Capítulo 3. Metodología**

La presente investigación está basada en un diseño experimental, debido a que permitió establecer la relación entre cantidad generada, composición de los residuos sólidos, así como el efecto de una inadecuada gestión integral de residuos sólidos. Además, posibilitó estimar la cantidad de biogás generado como resultado de la descomposición de los residuos en los sitios de disposición final (botadero de basura, celda emergente y relleno sanitario), a fin de determinar la factibilidad en la implementación de un sistema captación de biogás, para la generación de energía. En la figura 6, se detalla el procedimiento para estimar las emisiones de biogás producidas en los rellenos sanitarios del Ecuador: estimación de los beneficios económicos totales de la producción de biogás. A continuación, se describe cada uno de los criterios analizados.

#### **3.1 Calidad del aire en los sitios de disposición final RSU**

La metodología empleada para medir la calidad del aire se basó en lo establecido en la normativa ambiental vigente. De ahí que, los equipos, métodos y procedimientos que se utilizaran para la medición y determinación de la concentración de contaminantes se indican en la Norma de Calidad del Aire Ambiente o Nivel de Inmisión, Libro VI, Anexo 4, del Acuerdo Ministerial 097-A. El monitoreo será realizado por un laboratorio acreditado por el Servicio de Acreditación Ecuatoriana SAE.

Los resultados se comparan con los valores emitidos en el Acuerdo Ministerial 097-A del Ministerio del Ambiente publicado en el Registro Oficial N. 387 el 4 de noviembre del 2015, los cuales se encuentran detallados en la siguiente tabla:

*Tabla 34. Normas generales para concentraciones de contaminantes criterio en el aire ambiente*

<b>Contaminantes</b>	<b>Criterio</b>
Partículas sedimentables	La máxima concentración de una muestra, colectada durante 30 (treinta) días de forma continua, será de un miligramo por centímetro cuadrado ( $1 \text{ mg/cm}^2 \times 30 \text{ d}$ ).
Material particulado menor a 10 micrones ( $\text{PM}_{10}$ )	El promedio aritmético de monitoreo continuo durante 24 horas, no deberá exceder de cien microgramos por metro cúbico ( $100 \mu\text{g/m}^3$ ).
Material particulado menor a 2,5 micrones ( $\text{PM}_{2,5}$ )	El promedio aritmético de monitoreo continuo durante 24 horas, no deberá exceder de cincuenta microgramos por metro cúbico ( $50 \mu\text{g/m}^3$ ).
Dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ )	La concentración $\text{SO}_2$ en 24 horas no deberá exceder ciento veinticinco microgramos por metro cúbico ( $125 \mu\text{g/m}^3$ ), la concentración de este contaminante para un periodo de diez minutos, no debe ser mayor a quinientos microgramos por metro cúbico ( $500 \mu\text{g/m}^3$ ).
Monóxido de carbono (CO)	La concentración de monóxido de carbono de las muestras determinadas de forma continua, en un período de 8 (ocho) horas, no

	deberá exceder diez mil microgramos por metro cúbico ( $10000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).
Ozono ( $\text{O}_3$ )	La máxima concentración de ozono, obtenida mediante muestra continua en un período de (8) ocho horas, no deberá exceder de cien microgramos por metro cúbico ( $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), más de una vez en un año.
Dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ )	La concentración máxima en (1) una hora no deberá exceder doscientos microgramos por metro cúbico ( $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

Fuente: Acuerdo Ministerial 097-A (2015).

### 3.2 Concentración de ácido sulfúrico olores

Se realizará la medición cuantitativa de las emisiones de olores. Dado que los gases producidos por procesos de biodegradación al ser elementos muy variables, es preferible medir el impacto en el olfato humano. Donde según las experiencias muestran que los olores comienzan a ser molestos en una concentración de  $10 - 30 \text{ UO}/\text{m}^3$ . A continuación se muestra los niveles de concentración de las emisiones olfatorias.

Tabla 35. Niveles de concentración de emisiones olfatorias en el relleno sanitario

Fuentes de Olor	Unidad	Flujo específico de las emisiones olfatorias
Descarga de la basura	UO/ ( $\text{S}^*\text{tonelada de basura}$ )	0,7-4
Relleno Cubierto con tierra	UO/( $\text{S}^*\text{ha}$ )	90-500
Relleno sin cubierta	UO/( $\text{S}^*\text{ha}$ )	800-1500
Gas del Relleno	UO/( $\text{S}^*\text{m}^3$ )	Mayor $1\times 10^6$

Fuente: (Röben, Vásquez, & Ismael, 2002)

La molestia causada por las emisiones olfatorias de un relleno sanitario depende de las concentraciones de gases olfatorios a las cuales está expuesto un sitio (emisión).

Tabla 36. Componentes que emanen los rellenos sanitarios

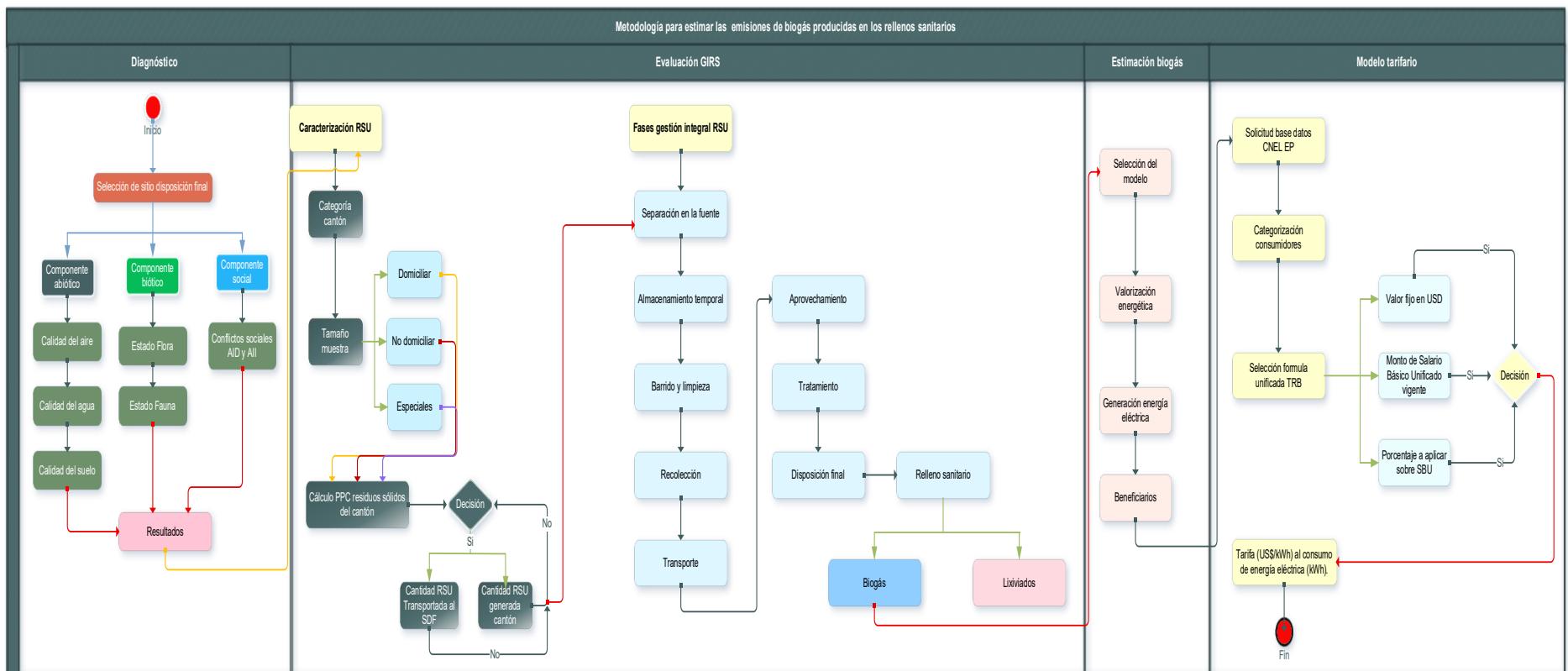
Compuesto	Fórmula o nombre común	Porcentaje en Volumen
Metano	$\text{CH}_4$	45-60
Dióxido de carbono	$\text{CO}_2$	40-60
Nitrógeno	$\text{N}_2$	2-5
Oxígeno	$\text{O}_2$	0,1-1,0
Sulfuro de hidrógeno	$\text{H}_2\text{O}$	0,0-1,0
Amoniaco	$\text{NH}_3$	0,1-1,0
Hidrógeno	$\text{H}_2$	0,0-0,2

Monóxido de Carbono	CO	0,0-2,0
Constituyentes cantidades de traza	-----	0,01-0,6

---

*Fuente: (Röben, Vásquez, & Ismael, 2002)*

*Figura 6. Metodología para estimar la cantidad de biogás generada en los rellenos sanitarios RSU*



Fuente: Elaboración propia

### **3.3 Caracterización de los residuos sólidos urbanos**

Para realizar la caracterización de los residuos sólidos urbanos, se utilizó la “Guía para la Caracterización de Residuos Sólidos Municipales” del Ministerio del Ambiente de Perú (MINAM, 2019) o OPS/CEPIS/04/IT-634 Guía para la caracterización de residuos sólidos municipales, dado que ofrece una serie de guías técnicas, dirigidas a profesionales del sector público y privado. Además de la guía técnica mencionada, se utilizó los procedimientos establecidos en cuatro Normas Mexicanas publicadas el 06 de noviembre de 1992. A continuación, se menciona cada una de ellas con su respectivo método para la caracterización de los residuos sólidos municipales:

- La NMX-AA-61-1985 (1992), establece el método para la determinación de la Producción Per Cápita (PPC).
- La NMX-AA-19-1985 (1992), establece el método para la determinación de la densidad o Peso Volumétrico “in situ” de los residuos y desechos sólidos.
- La NMX-AA-15-1985 (1992), establece el método de cuarteo para residuos y desechos y la obtención de la muestra para los análisis en el laboratorio.
- La NMX-AA-22-1985 (1992), establecen el método para la determinación de la composición física de los residuos y desechos sólidos.

Los criterios para considerar son los siguientes:

1. Determinación de la población actual y futura

$$PF = Pi \times (1 + r)^n \quad (43)$$

2. Determinación del número de muestras domiciliarias

$$n = \frac{(Z_{1-\alpha/2}^2)(N)(\sigma^2)}{(N - 1)(E^2) + (Z_{1-\alpha/2}^2)(\sigma^2)} \quad (44)$$

3. Determinación del número de muestras no domiciliarias y especiales
4. Sensibilización de los participantes

5. Codificación de los predios participantes y de las muestras
6. Recolección de muestras domiciliarias, no domiciliarias y especiales
7. Determinación de la PPC de los residuos y desechos sólidos domiciliarios, no domiciliarios y especiales
8. Determinación de la densidad de los residuos y desechos sólidos domiciliarios, no domiciliarios y especiales

### **3.4 Evaluación del servicio público de gestión integral de los residuos sólidos urbanos**

Para la evaluación del servicio público, se realizó, mediante el control de los indicadores operacionales, financieros de calidad y de costos a continuación se detalla los indicadores de eficiencia evaluados.

*Tabla 37. Indicadores operaciones para la evaluación de la GIRS*

Fase	Indicador	Rango aceptable
Almacenamiento temporal	Cantidad de contenedores y papeleras requeridos.  $No. Contenedores = \frac{Vol_{Generado}}{fxC_{cont}}$  $No. Contenedores = \frac{10 \times PPCxhab}{7xfx\rho x C_{cont}}$	1 cada 100 m
Barrido y limpieza	Cobertura del barrido de calles (%)  $\frac{Longitud\ de\ calles\ barridas}{Longitud\ total\ de\ calles} * 100\ %$	85 al 100 %
	Comparación de kilómetros barridos versus horas pagadas  $\frac{Longitud\ total\ de\ calles\ barridas\ al\ mes\ (km)}{Cantidad\ de\ horas\ pagadas\ al\ mes}$	0,14 a 0,16 km barridos/horas pagadas.
	Consumo de bolsas/barredor/día  $\frac{Consumo\ de\ bolsas\ al\ mes}{(Cantidad\ de\ barredores\ efectivos) * (días\ efectivos\ al\ mes)}$	7 a 9 bolsas/barredor/día
	Consumo de bolsas/ kilómetro barrido  $\frac{Consumo\ total\ de\ bolsas\ al\ mes}{Longitud\ total\ de\ calles\ barridas\ al\ mes}$	5 a 7 bolsas/kilómetro barrido

<b>Recolección</b>	$\frac{\text{Consumo de escobas/kilómetro barrido}}{\text{Consumo total de escobas al mes}}$	0,02 a 0,04 escobas/km barrido
	$\frac{\text{Longitud total de calles barridas al mes (km)}}{\text{km lineales barridos/barredor/día (calles)}}$	1,3 a 1,5 km lineales/barredor/día
	$\frac{\text{Longitud total de calles barridas al mes (km lineales)}}{(\text{Cantidad de barredores efectivos}) * (\text{días efectivos al mes})}$	
	$\frac{\text{Ayudante/vehículos programados/día}}{\text{Total de } \frac{\text{jornadas}}{\text{ayudantes}} / \text{mes}}$	2 ayudantes/vehículo programado/día. Con 43% de frecuencia diaria y 57% de frecuencia interdiaria)
	$\frac{(\text{Cantidad de vehículos programados (turnos)}) * (\text{días efectivos al mes})}{\text{Cobertura de recolección (%)}}$	85 a 100%.
	$\frac{\text{Población urbana servida (habitantes)} * 100 \%}{\text{Población urbana total}}$	
	$\frac{\text{Comparación de toneladas recolectadas versus horas pagadas}}{\frac{\text{Cantidad de residuos recolectados al mes (t)}}{\text{Cantidad de horas pagadas al mes}}}$	0,30 a 0,35
<b>Transporte</b>	$\frac{\text{kg/kilómetro de sector}}{\frac{\text{Cantidad de residuos recolectados al mes} * 1000 (kg)}{\text{Longitud recorrida en los sectores al mes (km)}}}$	500 a 600 kg/km de sector Servicio con 43% de frecuencia diaria y 57% de frecuencia interdiaria, método de acera, 2 ayudantes).
	$\frac{\text{kg/kilómetro total recorrido}}{\frac{\text{Cantidad de residuos recolectados al mes} * 1000 (kg)}{\text{Longitud recorrida po los vehículos al mes (km)}}}$	100 a 150 kg/total km recorridos
	$\frac{\text{Toneladas/ayudante/día}}{\frac{\text{Cantidad de residuos recolectados al mes (t)}}{(\text{cantidad de ayudantes efectivos al mes}) * (\text{días efectivos al mes})}}$	4,5 a 5,0 t/ayudante/día Método de acera
	$\frac{\text{Toneladas/sector/día}}{\frac{\text{Cantidad de residuos recolectadas al mes (t)}}{(\text{cantidad de sectores}) * (\text{días efectivos al mes})}}$	12 a 14 t/sector/día
	$\frac{\text{Toneladas/tiempo total de recolección}}{\frac{\text{Cantidad de residuos recolectadas al mes (t)}}{\text{Tiempo total de recolección al mes (horas de recolección)}}}$	2,3 a 2,6 t/hora de recolección
	$\frac{\text{Costo total de recolección por tonelada}}{\frac{\text{Costo total anual servicio de recolección}}{\text{toneladas recolectadas en un año}}}$	\$/ton
	$\frac{\text{Toneladas/vehículos programados/día}}{\frac{\text{Cantidad de residuos recolectados al mes (t)}}{(\text{cantidad de vehiculos programados}) * (\text{días efectivos al mes})}}$	26 a 30 t/vehículos programados/día
<b>Transporte</b>	$\frac{\text{Tonelada/viaje}}{\frac{\text{Cantidad de residuos recolectados al mes (t)}}{\text{Cantidad de viajes realizados al mes}}}$	6 a 7 t/viaje
	$\frac{\text{Disponibilidad mensual de vehículos (%)}}{\frac{\text{Horas } \frac{\text{laborables}}{\text{veh}} - \text{horas de mantenimiento/veh}}{\text{Horas laborables/vehiculo}}}$	Superior a 0.85

$\frac{\text{Operatividad de los vehículos de recolección} (\%)}{\frac{\text{Cantidad de vehículos de recolección operativos} * 100}{\text{Cantidad de vehículos de recolección}}}$	85 – 100%
$\frac{\text{Rendimiento del combustible}}{\frac{\text{Longitud recorrido por los vehículos mes (km)}}{\text{Cantidad de combustible utilizado por los vehículos al mes}}}$	2 a 3 Km/litro
$\frac{\text{Rendimiento de neumáticos}}{\frac{\text{Longitud rodada por neumático (Km/neumático)}}{\text{Cantidad de combustible utilizado por los vehículos al mes}}}$	40.000 a 50.000 km (llanta radial, incluye la primera vida más reencauche).
$\frac{\text{Horas trabajadas en mantenimiento correctivo/horas trabajadas en mantenimiento}}{\frac{\text{Horas – hombre efectivos de mantenimiento correctivo} * 100}{\text{Horas – hombre efectivas de trabajo}}}$	Menor que 30%
$\frac{\text{Horas trabajadas en mantenimiento preventivo/horas trabajadas en mantenimiento}}{\frac{\text{Horas – hombre efectivos de mantenimiento correctivo} * 100}{\text{Horas – hombre efectivas de trabajo}}}$	Mayor que 70%
$\frac{\text{Órdenes de trabajo planificadas/órdenes de trabajo ejecutadas}}{\frac{\text{Cantidad de ordenes de trabajo planificadas} - 100}{\text{Cantidad de ordenes de trabajo ejecutadas}}}$	95 %
$\text{Costo de neumáticos por km}$ $N \left[ \frac{CN + R(CR)}{VN + R(VR)} \right]$	\$/Km
N: Cantidad de ruedas por vehículo R: Cantidad de reencauches VN: Vida útil de un neumático nuevo (km) VR: Vida útil de un neumático reencauchado (km) CN: Costo de un neumático nuevo CR: Costo de un neumático reencauchado.	
$\frac{\text{Costos de mantenimiento por toneladas recolectadas}}{\frac{\text{Costo total deservicios de mantenimiento}}{\text{Cantidad de residuos recolectados al mes}}}$	US\$ 3,0 a 5,0 tonelada recolectada
$\frac{\text{Costo por kilómetro}}{\frac{\text{Costo total del servicio de recolección al mes}}{\text{Longitud total recorrido por los vehículos al mes}}}$	US\$ 2,5 a 3,5 km recorridos.
Días laborables: (Total de horas laboradas * No. de días del mes).	
$\frac{\text{Días de ausencia} * 100 \%}{\text{Días laborables}}$	3 a 4%.

## Aprovechamiento

$\frac{\text{Cantidad de material reciclado}}{\frac{\text{Cantidad de material reciclado}}{\text{Total de material recolectado}} * 100 \%}$	50 a 85 %
---	-----------

<b>Tratamiento</b>	Rendimiento de compost por tonelada de residuo  $\frac{\text{Cantidad de compost obtenido (t)} * 100}{\text{Cantidad dde residuos utilizados como materia prima (t)}}$	30 a 35% (en 3 meses)
	Cobertura del servicio de disposición final (%)  $\frac{\text{Cantidad de residuos en el relleno sanitario (t)}}{\text{Cantidad de residuos recolectados (t)}}$	85 a 100%.
<b>Disposición final</b>	Relación entre capacidad neta y volumen a ocupar en un relleno sanitario  $\frac{\text{Capacidad total que ocuparánlos resiudos (m}^3\text{)}}{\text{Volumen de residuos recibidos al día (\frac{m}{{día}})}}$	(0,75 t/m <sup>3</sup> )
	Toneladas recibidas/horas máquina  $\frac{\text{Cantidad de residuos recibidos al mes en el relleno sanitario (t)}}{\text{Cantidad de horas máquinas total empleadas al mes (\frac{h}{maq})}}$	40 a 50 t/horas máquina
<b>Tarifa</b>	Retorno de ingresos  $\frac{\text{Ingresar por cobro tarifa aseo}}{\text{Costo total servicio aseo}} * 100$	%
	Indicadores de facturación  $\frac{\text{Valor mensual facturado}}{\text{Valor mensual cobrado a clientes públicos /privados}}$	1 a 1.25

Así mismo para evaluar la gestión integral de los residuos sólidos se aplicó los formatos establecidos por la Autoridad Ambiental MAATE. Los formatos aplicados se encuentran en el Anexo 2.

Para la valoración cuantitativa del grado de cumplimiento de los aspectos e indicadores establecidos, se consideró la siguiente escala.

1. Escala de cumplimiento de los aspectos e indicadores del 1 al 10, siendo 10 cuando el aspecto y el indicador está dentro los parámetros establecidos o esperados y 1 indicador con desempeño problemático a los valores establecidos.
2. Factor de ponderación para determinar el grado de importancia del cumplimiento de los aspectos e indicadores dispuestos.
3. Para determinar el nivel de conformidades y no conformidades encontradas se aplicó la siguiente ecuación [57,92].

$$\text{Nivel de Certidunbre} = \sum(W * C) x 10(%) \quad (45)$$

Donde:

C= calificaciones de niveles del 1 al 10

W= ponderación de importancia del aspecto o indicador

$$W = \sum \frac{I_i}{I_{total}} \quad (46)$$

I= calificación de importancia del aspecto ambiental en escala de 1 al 10.

*Tabla 38. Escala de cumplimiento de los aspectos e indicadores*

Calificación de niveles		Descripción
Cualitativos	Cuantitativos	
Deficiente	1	Indicador con desempeño problemático de acuerdo con los valores establecidos.
Regular	5	Cuando el desempeño es potencialmente problemático o presenta alguna deficiencia no grave.
Bueno	10	Cuando el indicador está dentro de los parámetros sugeridos o esperados.

Fuente: Indicadores [57,90].

Para realizar la evaluación, valoración y la determinación de los hallazgos conformidad C, No Conformidad Menor NC-, No Conformidad Mayor NC+ y el Nivel de Cumplimiento, se utilizó la Tabla 39. Así mismo los hallazgos fueron evaluados según lo dispuesto en el Reglamento al Código Orgánico del Ambiente RCOA, Artículos 499, 500 y 501.

*Tabla 39. Valoración del nivel de cumplimiento y la conformidad [93]*

Valoración	Nivel de Certidumbre	Nivel de No Conformidad	Hallazgos
0-0.25 %	Muy Malo	Bajo	No Conformidad Mayor
26-50 %	Malo	Medio	No Conformidad Menor
51-70 %	Medio	Alto	
71-90 %	Bueno	Muy Alto	Conformidad
91-100 %	Excelente	Excelente	C

### 3.5 Estimar la cantidad de biogás generada en los rellenos sanitarios RSU

Para la estimar la cantidad de biogás generada en los sitios de disposición final (relleno sanitario, celda emergente y botadero), se seleccionó el Modelo de Emisiones de Gases de Vertederos (LandGEM v 3.03) de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), es un archivo de Microsoft Excel que utiliza la ecuación de primer orden para estimar la generación de biogás anuales, este modelo considera los siguientes parámetros: la tasa de generación, capacidad potencial de metano CH<sub>4</sub>, concentración de CAA [1–4].

$$Q_{CH_4} = \sum_{t=1}^n \sum_{j=0.1}^1 k L_0 \left( \frac{M_i}{10} \right) e^{-kt_j} \quad (45)$$

Donde:

$Q_{CH_4}$  = generación anual de metano en el año de cálculo (m<sup>3</sup>/año).

i= incrementos de 1 año

n= (año del cálculo) – (año inicial en que se aceptó el residuo).

j = incremento de 0.1 años

k = índice de generación de metano (1/año).

$L_0$  = generación potencial de metano (m<sup>3</sup>/Mg).

$M_i$  = Masa de residuos depositados en el año ith (Mg).

$T_{ij}$  = edad de la sección j de masa de residuos depositados en el año i (años decimales).

El modelo utiliza dos tipos de constantes el primero es valor de k considera las variables temperatura, humedad la disponibilidad de nutrientes y el pH y el segundo el  $L_0$  considera la composición de los residuos sólidos en la tabla 3 se muestra los índices para los valores de k y  $L_0$ . El modelo supone que las emisiones de los rellenos sanitarios este compuesto por el 50 % CH<sub>4</sub> y el 50 % CO<sub>2</sub> y otros contaminantes atmosféricos. Es por ello si el contenido de CH<sub>4</sub> está fuera del rango 40 a 60 % no es recomendable la utilización del modelo LandGEM.

Tabla 40. Índice de generación de metano Modelo LandGEM -EPA

Tipo concentración emisiones	Tipo relleno sanitario.	K (1/año)	L <sub>0</sub> (m <sup>3</sup> /Mg)
CAA	Convencional	0,05	170
CAA	Zona árida	0,02	170
Inventario	Convencional	0,04	100
Inventario	Zona árida	0,02	100
Inventario	Humedad (Biorreactor)	0,7	96

Fuente: LandGEM [96,97]

Tabla 41. Índice y potencia de generación de metano CH<sub>4</sub>

Precipitación (mm/año)	K		L <sub>0</sub>	
	≤50%	≥60%	≤50%	≥60%
0–249	0,04	0,043	60	62
250–499	0,05	0,053	80	83
500–999	0,065	0,69	84	87
1000–1999	0,08	0,085	84	87
2000 + saturado	0,08	0,085	84	87

Fuente: LandGEM [96,97]

Para estimar el potencial de producción de energía, se utilizó el principio de la cogeneración por medio de motores de combustión interna (MCI), por su costo bajo por kW/USD, eficiencia elevada de ahí que para estimar la energía eléctrica disponible se utilizó la siguiente ecuación.

$$E_{dispo.} = \frac{PCI_{biogas} \times Q_{b.r.} \times \delta}{\gamma_1} \left[ \frac{kWh}{year} \right] \quad (46)$$

Donde:

$E_{dispo.}$  = disponible = energía eléctrica disponible

$PCI_{biogas}$  = poder calorífico interior del biogás

$Q_{b.r.}$  = caudal del biogás recuperable (m<sup>3</sup>/año)

$\gamma_1$  = factor de conversión de MJ a kWh (1 MJ/0.28 kWh)

### 3.6 Modelo tarifario del servicio de gestión integral de residuos sólidos urbanos

Considerando que el modelo tarifario considera, los suministros de electricidad, agua, telecomunicaciones, transporte y gestión de residuos no peligrosos. Para la implementar la tasa de recolección de residuos sólidos se realizará a través del consumo de energía por lo que se vinculará al servicio de energía eléctrica. En este contexto, la Corporación Nacional de Electricidad (CNEL - EP) ha establecido un sistema unificado para el cálculo de la tasa de recolección de basura unificado, utilizando la siguiente ecuación:

$$TRB = [(1 + B) + (SBU * C) + (EAC * D)] \quad (47)$$

*Fuente: Asociación de Municipalidades Ecuatorianas*

Por otro lado, se calculará los indicadores VAN (Valor actual neto) y TIR (Tasa interna de retorno financiero) VAN (Valor actual neto).

**VAN (Valor actual neto):** Resulta de comparar el valor presente de los ingresos con el valor presente de los egresos asociados al proyecto, además, este indicador refleja la rentabilidad operativa acumulada al término de la vida útil del proyecto, permitiendo evaluar su viabilidad económica y su capacidad para generar beneficios netos en términos reales (Romero, 2013).

$$VPN = -P + \frac{FNE_1}{(1+i)^1} + \frac{FNE_2}{(1+i)^2} + \frac{FNE_3}{(1+i)^3} + \frac{FNE_4}{(1+i)^4} \quad (48)$$

Dónde:

VPN= Valor Presente Neto, indicador que mide la diferencia entre el valor actual de los ingresos y egresos del proyecto.

FNE= Flujo Neto de Efectivo en el período 1, que representa la diferencia entre los ingresos y egresos de dicho período.

I=Tasa de interés pasiva, utilizada como factor de descuento para calcular el valor presente de los flujos futuros.

**TIR (Tasa interna de retorno financiero):** Es la tasa de interés que refleja el rendimiento generado por los fondos que permanecen reinvertidos en un proyecto a lo largo de su desarrollo, en lugar de aplicarse exclusivamente sobre la inversión inicial, por consiguiente, este indicador permite medir la rentabilidad efectiva del capital en función de su uso

continuo dentro del proyecto, destacando su capacidad para generar beneficios adicionales durante su ejecución (Romero, 2013).

$$TIR = - \frac{FNE_1}{(1+i)^1} + \frac{FNE_2}{(1+i)^2} + \frac{FNE_3}{(1+i)^3} + \frac{FNE_4}{(1+i)^4} \quad (49)$$

Dónde:

TIR= Tasa Interna de Retorno, indicador que mide la rentabilidad promedio anual generada por el proyecto, representando la tasa de descuento que iguala el valor presente de los flujos netos con la inversión inicial.

FNE=Flujo Neto de Efectivo, diferencia entre los ingresos y egresos generados durante un período determinado.

$i$ = Tasa de interés, calculada como la suma de la tasa pasiva referencial y la tasa activa referencial, utilizada como base para evaluar el costo del dinero y la viabilidad del proyecto.

**Cálculo del indicador B/C (beneficio costo):** Es el beneficio económico obtenido por cada dólar invertido en un proyecto de naturaleza social y productiva, además, Este indicador permite medir la eficiencia y rentabilidad del capital asignado, evidenciando el impacto positivo que el proyecto genera en términos monetarios y su contribución al desarrollo socioeconómico (Espinoza, Fonseca, & Jiménez, Ingeniería Económica, 2013).

$$RBC = \frac{B}{C} \quad (50)$$

Donde:

Beneficio= Representa la sumatoria de todos los ingresos monetarios generados durante la vida útil del proyecto, incluidos aquellos derivados de su operación y actividades complementarias.

Costo= Corresponde a la sumatoria de todos los egresos monetarios asociados al proyecto a lo largo de su vida útil, incluyendo los costos directos, indirectos y operativos necesarios para su ejecución y mantenimiento.

# **CAPÍTULO 4.**

## **ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS**

---

## **4 Capítulo 4. Análisis e interpretación de los datos obtenidos en la investigación**

### **4.1 Calidad del aire en los sitios de disposición final RSU**

Una vez realizado el reconocimiento de las condiciones de los sitios de disposición final, se llevó a cabo el monitoreo de calidad de aire ambiente de dos botaderos, ubicados en los cantones Loreto y Francisco de Orellana debido a que no cuentan con un sistema de captación de biogás como chimeneas para realizar el monitoreo de biogás de ahí que se realizó el monitoreo de la calidad de aire. En cuanto al botadero del cantón Aguarico el sitio de disposición final se encontraba con una orden judicial.

Los resultados obtenidos del monitoreo de la calidad del aire del botadero de basura del cantón Francisco Orellana, permitió determinar la concentración de contaminantes y los niveles de alerta en la calidad del aire. A continuación, se detalla los resultados de calidad del aire realizado al área de influencia directa (AID) y área de influencia indirecta (All) como son las comunidades La paz, Los Laureles, 6 de octubre y el Oro. Donde se utilizó un sistema de semaforización para resaltar el cumplimiento el color verde cumple y el color rojo no cumple.

#### **4.1.1 Calidad del aire sitio de disposición final del cantón Francisco de Orellana**

*Tabla 42. Calidad de aire botadero de basura cantón Francisco de Orellana*

Parámetros	Tiempo de monitoreo	Unidad	Límite máximo permisible	Resultado corregido	Cumplimiento
Monóxido de Carbono	8 horas	µg/m³	10.000	2.775	Cumple
Ozono	8 horas	µg/m³	100	18	Cumple
Dióxido de nitrógeno	1 hora	µg/m³	200	11	Cumple
Dióxido de azufre	24 horas	µg/m³	125	22	Cumple
Material particulado PM10	24 horas	µg/m³	100	12	Cumple
Material particulado PM2,5	24 horas	µg/m³	50	8	Cumple

*Fuente: Estudio cierre técnico segunda etapa GADMFO, 2022.*

*Tabla 43. Niveles máximos permisibles para contaminantes no convencionales con efectos tóxicos y/o cancerígenos*

Parámetros	Tiempo de monitoreo	Unidad	Límite máximo permisible	Resultado corregido	Cumplimiento
Benceno	Anual	µg/m³	5	<0,095	Cumple
Cadmio	Anual	µg/m³	5x10⁻³	<0,004	Cumple
Mercurio inorgánico vapores	Anual	µg/m³	1	<0,021	Cumple

*Fuente: Estudio cierre técnico segunda etapa GADMFO, 2022.*

*Imagen 5. Calidad de aire punto de emisión botadero de basura cantón Francisco de Orellana*



*Fuente: Estudio cierre técnico segunda etapa GADMFO, 2022.*

#### 4.1.1.1 Calidad del aire ambiente comunidad La Paz

Tabla 44. Calidad del aire ambiente comunidad La Paz

Parámetros	Tiempo de monitoreo	Unidad	Límite máximo permisible	Resultado corregido	Cumplimiento
Monóxido de Carbono	8 horas	µg/m³	10.000	2. 474	Cumple
Ozono	8 horas	µg/m³	100	17	Cumple
Dióxido de nitrógeno	1 hora	µg/m³	200	5	Cumple
Dióxido de azufre	24 horas	µg/m³	125	15	Cumple
Material particulado PM10	24 horas	µg/m³	100	30	Cumple
Material particulado PM2,5	24 horas	µg/m³	50	12	Cumple

Tabla 45. Niveles máximos permisibles para contaminantes no convencionales con efectos tóxicos y/o cancerígenos

Parámetros	Tiempo de monitoreo	Unidad	Límite máximo permisible	Resultado corregido	Cumplimiento
Partículas sedimentables	30 días	mg/cm²	1	0,39	Cumple
Benceno	Anual	µg/cm²	5	<0,095	Cumple

Imagen 6. Calidad del aire ambiente comunidad La Paz



Fuente: Estudio cierre técnico segunda etapa GADMFO, 2022.

#### 4.1.1.2 Calidad del aire ambiente comunidad Los Laureles

*Tabla 46. Calidad del aire ambiente comunidad Los Laureles*

Parámetros	Tiempo de monitoreo	Unidad	Límite máximo permisible	Resultado corregido	Cumplimiento
Monóxido de Carbono	8 horas	µg/m³	10.000	2.655	Cumple
Ozono	8 horas	µg/m³	100	13	Cumple
Dióxido de nitrógeno	1 hora	µg/m³	200	7	Cumple
Dióxido de azufre	24 horas	µg/m³	125	16	Cumple
Material particulado PM10	24 horas	µg/m³	100	27	Cumple
Material particulado PM2,5	24 horas	µg/m³	50	8	Cumple

*Fuente: Estudio cierre técnico segunda etapa GADMFO, 2022.*

*Tabla 47. Niveles máximos permisibles para contaminantes no convencionales con efectos tóxicos y/o cancerígenos*

Parámetros	Tiempo de monitoreo	Unidad	Límite máximo permisible	Resultado corregido	Cumplimiento
Partículas sedimentables	30 días	mg/cm²	1	0,27	Cumple
Benceno	Anual	µg/cm²	5	<0,095	Cumple

*Imagen 7. Calidad del aire ambiente Los Laureles*



*Fuente: Estudio cierre técnico segunda etapa GADMFO, 2022.*

#### 4.1.1.3 Calidad del aire ambiente comunidad El Oro

Tabla 48. Calidad del aire ambiente comunidad El Oro

Parámetros	Tiempo de monitoreo	Unidad	Límite máximo permisible	Resultado corregido	Cumplimiento
Monóxido de Carbono	8 horas	µg/m³	10.000	2.113	Cumple
Ozono	8 horas	µg/m³	100	9	Cumple
Dióxido de nitrógeno	1 hora	µg/m³	200	3	Cumple
Dióxido de azufre	24 horas	µg/m³	125	18	Cumple
Material particulado PM10	24 horas	µg/m³	100	22	Cumple
Material particulado PM2,5	24 horas	µg/m³	50	6	Cumple

Fuente: Estudio cierre técnico segunda etapa GADMFO, 2022.

Tabla 49. Niveles máximos permisibles para contaminantes no convencionales con efectos tóxicos y/o cancerígenos

Parámetros	Tiempo de monitoreo	Unidad	Límite máximo permisible	Resultado corregido	Cumplimiento
Partículas sedimentables	30 días	mg/cm²	1	0,28	Cumple
Benceno	Anual	µg/cm²	5	<0,095	Cumple

Fuente: Estudio cierre técnico segunda etapa GADMFO, 2022.

Imagen 8. Calidad del aire ambiente comunidad El Oro



Fuente: Estudio cierre técnico segunda etapa GADMFO, 2022.

#### 4.1.1.4 Calidad del aire ambiente comunidad 6 de Octubre

*Tabla 50. Calidad del aire ambiente comunidad 6 de Octubre*

Parámetros	Tiempo de monitoreo	Unidad	Límite máximo permisible	Resultado corregido	Cumplimiento
Monóxido de Carbono	8 horas	µg/m³	10.000	3.113	Cumple
Ozono	8 horas	µg/m³	100	17	Cumple
Dióxido de nitrógeno	1 hora	µg/m³	200	14	Cumple
Dióxido de azufre	24 horas	µg/m³	125	26	Cumple
Material particulado PM10	24 horas	µg/m³	100	33	Cumple
Material particulado PM <sub>2,5</sub>	24 horas	µg/m³	50	10	Cumple

*Fuente: Estudio cierre técnico segunda etapa GADMFO, 2022.*

*Tabla 51. Niveles máximos permisibles para contaminantes no convencionales con efectos tóxicos y/o cancerígenos*

Parámetros	Tiempo de monitoreo	Unidad	Límite máximo permisible	Resultado corregido	Cumplimiento
Partículas sedimentables	30 días	mg/cm²	1	0,32	Cumple
Benceno	Anual	µg/cm²	5	<0,095	Cumple

*Imagen 9. Calidad del aire ambiente comunidad 6 de Octubre*



*Fuente: Estudio cierre técnico segunda etapa GADMFO, 2022.*

Del análisis realizado para determinar la calidad de aire, se evidencia que los parámetros establecidos en el AM 097 A, Anexo 4, tabla 1. Concentración de contaminantes criterio que definen los niveles de alerta, de alarma y de emergencia en la calidad del aire, Tabla 2. Métodos de medición de concentraciones criterio del aire y la Tabla 3. Niveles máximos permisibles para contaminantes no convencionales con efectos tóxicos y/o carcinogénicos, se encuentra dentro de los límites permisibles. Sin embargo, existe la presencia de olores en el punto del botadero.

#### **4.1.2 Calidad de aire ambiente del sitio de disposición final cantón Loreto**

De igual modo debido a que el sitio de disposición final del cantón Loreto no cuenta con un sistema de chimeneas que permita realizar el monitoreo de biogás, se realizó el monitoreo de calidad de aire ambiente los resultados. se compararon con la tabla 1, anexo 4, del AM 097 A. A continuación, se detalla los resultados de la calidad del aire ambiente en el botadero.

*Tabla 52. Calidad del aire ambiente botadero cantón Loreto*

Parámetros	Límite Máximo Permisible	Unidad	Resultado	Criterio
Monóxido de Carbono	10000	ug/m3	1.124	Cumple
Dióxido de nitrógeno	200	ug/m3	28	Cumple
Dióxido de azufre	125	ug/m3	25	Cumple
Ozono	100	ug/m3	37	Cumple
PM10	100	ug/m3	35	Cumple
PM2.5	50	ug/m3	25	Cumple
Partículas Sedimentables mg/cm2 X 30 días	1	ug/m3	0,18	Cumple

*Fuente: Estudio y Diseño GIRS GADML, cantón Loreto, 2024*

*Imagen 10. Calidad del aire ambiente botadero cantón Loreto*



*Fuente: Estudio y Diseño GIRS GADML, cantón Loreto, 2024*

Del análisis realizado se puede evidenciar que, la calidad del aire ambiente en el área del botadero se encuentra dentro de los límites permitidos establecida en la normativa antes mencionada lo que no representa una alerta para el área de influencia directa comunidad El Triunfo bajo, así como para los colindantes.

#### **4.2 Concentración de ácido sulfúrico ( $H_2S$ ) olores**

Se efectuó el monitoreo de olores considerando 3 puntos, punto 1, como punto blanco, punto 2, un radio de 500 m, punto 3, un radio de 1000 m. Los análisis indicaron que la concentración del ácido sulfídrico ( $H_2S$ ) estuvo por debajo del límite de cuantificación LOQ). Conforme al criterio de prevención, se adoptó como valor de exposición el LOQ/10, dado que nos es posible garantizar concentraciones próximas a cero. Los resultados inferiores al valor de referencia establecido evidencian que los niveles de exposición solo generan una percepción leve de olor, sabor o irritación. A continuación, se presentan los resultados del monitoreo.

*Tabla 53. Monitoreo de olores – H<sub>2</sub>S, punto blanco o punto de referencia*

Punto de Muestreo	Muestra 01 - Muestra 01 (Radio 0-500)
Compuesto Evaluado	Sulfuro de hidrógeno
Formula Química	H <sub>2</sub> S
Peso molecular (gmol)	34,08
AEGL-1, Exposición 8 horas (ppm)	0,33
Concentración de contaminante reportado (ppm)	<0,021
Criterio de Evaluación	0,0

*Fuente: Estudio y Diseño GIRS GADML, cantón Loreto, 2024*

*Tabla 54. Monitoreo de olores – H<sub>2</sub>S, punto de monitoreo a 500 m*

Punto de Muestreo	Muestra 01 - Muestra 01 (Radio 0-500)
Compuesto Evaluado	Sulfuro de hidrógeno
Formula Química	H <sub>2</sub> S
Peso molecular (gmol)	34,08
AEGL-1, Exposición 8 horas (ppm)	0,33
Concentración de contaminante reportado (ppm)	<0,021
Criterio de Evaluación	Leve

*Fuente: Estudio y Diseño GIRS GADML, cantón Loreto, 2024*

*Tabla 55. Monitoreo de olores – H<sub>2</sub>S, punto de monitoreo a 1000 m*

Punto de Muestreo	Muestra 02 (Radio 1000 MT / Blanco)
Compuesto Evaluado	Sulfuro de hidrógeno
Formula Química	H <sub>2</sub> S
Peso molecular (gmol)	34,08
AEGL-1, Exposición 8 horas (ppm)	0,33
Concentración de contaminante reportado (ppm)	<0,022
Criterio de Evaluación	Leve

*Fuente: Estudio y Diseño GIRS GADML, cantón Loreto, 2024*

*Imagen 11. Monitoreo de olores del cantón Loreto*



*Fuente: Estudio y Diseño GIRS GADML, cantón Loreto, 2024*

### **4.3 Caracterización de los residuos sólidos urbanos**

#### **4.3.1 Composición de los residuos sólidos urbanos del cantón Guayaquil**

El relleno sanitario Las Iguanas morfológicamente está subdivido en cuatro sitios de colocación de desechos, definidos como Sectores A, B, C, D y un área de expansión aledaño al sector D denominado sector E con 110 (Ha) aproximadamente. Según la caracterización realizada en el 2024 el cantón Guayaquil dispone en el relleno sanitario las Iguanas 4.400 ton/día de residuos.

##### **1. Sector A**

El sector A ocupa 37,35 hectáreas y se recibieron desechos desde el 28 de septiembre de 1994 hasta el año 2006 se almacenaron 6.108.743 toneladas métricas de desechos hasta la cota +75, y de septiembre/01 a diciembre/31 del 2018 se almacenaron en dicho sector 339.478 toneladas de desechos, almacenando a la fecha 6.448.220,74 toneladas de desechos métricos hasta la cota +85.

##### **2. Sector “B”**

Sector “B” se dispuso sanitariamente desechos de material de construcción, demolición y limpieza de canales de AA. LL de la Ciudad de Guayaquil, entre otros, almacenando hasta

el 31 de diciembre del 2012, un total de 2.135.817,46 toneladas métricas de desechos. (Desde la cota +36 hasta la cota +65).

### **3. Sector “C”**

El sector “C” ocupa 20,39 hectáreas y recibió desechos sólidos desde nov. del 2003 hasta sept. del 2006, almacenando 1.811.305,04 toneladas métricas de desechos sólidos hasta la cota +80.

### **4. Sectores “B’ Y C’**

En los denominados sectores “B’ y C’” se han dispuesto sanitariamente desde septiembre de 1994 hasta diciembre de 2015 un total de 2.380.594,17 toneladas métricas de desechos correspondientes a material de construcción, demolición, limpieza de canales entre otros.

### **5. Sector “D”**

El sector “D” ocupa 56,01 hectáreas y es el sitio que actualmente se encuentra en operación, se han recibido desechos desde el 28 de septiembre de 2006 y hasta el 31 de enero de 2024 se han dispuesto sanitariamente en el referido Sector D aproximadamente 23.711,04 toneladas métricas de desechos. (Desde cota+36 hasta la cota +75 actualmente, teniendo como finalidad llegar a la cota +104). El área restante corresponde a los sectores de oficinas, talleres de mantenimiento, sistema de balanzas, vías principales de ingreso, áreas verdes, piscinas para almacenamiento temporal de lixiviados, sectores de extracción de material pétreo para cobertura.

*Imagen 12. Sectores A, B, C, D Relleno Sanitario Las Iguanas*



*Fuente: Las Iguanas, 2025*

A continuación, se detalla la cantidad de residuos sólidos dispuestos en el relleno sanitario Las Iguanas desde septiembre de 1994 hasta 2021.

Tabla 56. Toneladas ingresadas por sectores al relleno sanitario Las Iguanas

Años	Desechos Orgánicos				Desechos Inertes			Totales Anuales
	Sector "A"	Sector "C"	Sector "D"	Sub Total	Sector "B Y B''	C'	Sub Total	
28-sep-94	119.801,20			119.801,20	1.543,22		1.543,22	121.344,42
1995	516.878,98			516.878,98	19.509,98		19.509,98	536.388,96
1996	552.448,04			55.448,04	56.595,94		56.595,94	609.043,98
1997	606.170,39			606.170,39	37.399,64		37.399,64	643.570,03
1998	645.050,51			645.050,51	93.378,28		93.378,28	738.428,79
1999	615.307,52			615.307,52	44.223,55		44.223,55	659.531,07
2000	616.487,80			616.487,80	52.131,26		52.131,26	668.619,06
2001	634.669,19			634.669,19	71.478,55		71.478,55	706.147,74
2002	668.046,42			668.046,42	105.580,92		105.580,92	773.627,34
2003	600.002,63	94.165,67		694.168,30	133.626,85		133.626,85	827.795,15
2004	485.794,11	303.406,09		789.200,20	70.002,09		70.002,09	859.202,29
2005	0,00	829.754,06		829.754,06	87.335,35		87.335,35	917.089,41
2006	48.085,82	583.979,22	217.622,77	849.687,81	99.615,75		99.615,75	949.303,56
2007			888.290,60	888.290,60	192.236,32		192.236,32	1.080.526,92
2008			889.350,33	889.350,33	232.877,54		232.877,54	1.122.227,87
2009			917.616,44	917.616,44	192.243,68		192.243,68	1.109.860,12
2010			997.417,70	997.417,70	169.272,45		169.272,45	1.166.690,15
2011			1.091.657,51	1.091.657,51	181.394,59		181.394,59	1.273.052,10
2012			1.200.504,57	1.200.504,57	130.967,02		130.967,02	1.331.471,59

2013		1.234.367,84	1.234.367,84	145.262,62	7.277,23	152.539,85	1.386.907,69	
2014		1.332.049,29	1.332.049,29	19.141,86	114.220,55	133.362,41	1.465.411,70	
2015		1.392.561,99	1.392.561,99		123.278,93	123.278,93	1.515.840,92	
2016		1.606.244,85	1.606.244,85				1.606.244,85	
2017		1.614.293,53	1.614.293,53				1.614.293,53	
2018	339.110,15	1.256.167,55	1.595.277,70				1.595.277,70	
2019	367,98	1.604.994,22	1.605.362,20				1.605.362,20	
2020		1.557.410,61	1.557.410,61				1.557.410,61	
2021		273.371,39	273.371,39				273.371,39	
TOTALES	6.448.220,74	1.811.305,04	18.073.921,19	26.333.446,97	2.135.817,46	244.776,71	2.380.594,17	28.714.041,14

Fuente: Relleno Sanitario Las Iguanas DACMSE-CO-2021-1200

#### 4.3.2 Composición de los residuos sólidos urbanos cantón Francisco de Orellana

El cantón Francisco de Orellana en el 2022, generó 82,08 ton/día, resultado de la suma de las siguientes fuentes: domiciliaria (49,57 ton/día), no domiciliaria (34,51 ton/día) y especial (0,195 ton/día, correspondiente a desechos sanitarios). En términos de representatividad, la generación domiciliaria contribuye con el 58,67 % del total cantonal, mientras que las fuentes no domiciliarias y especiales aportan con el 41,10 % y el 0,23 %, respectivamente, como se muestra en la Tabla 57. Así mismo, la PPC del cantón Francisco de Orellana en el 2022 fue de 0,852 kg/hab/día. A continuación, se muestra la proyección de la generación de los RSU generados en el cantón Francisco de Orellana para un periodo de 25 años considerando el año 1, el 2024 hasta 2048.

*Tabla 57. Proyección de la generación de RSU del cantón Francisco de Orellana*

No.	Año	Residuos cantón domiciliar (Ton/día)	Residuos cantón no domiciliar (Ton/día)	Total, residuos generados en el Cantón (Ton/día)
-	2022	47,57	34,51	82,08
0	2023	49,73	35,29	85,02
1	2024	52,38	36,06	88,45
2	2025	55,12	36,84	91,96
3	2026	57,96	37,62	95,58
4	2027	60,90	38,40	99,30
5	2028	63,94	39,18	103,12
6	2029	67,09	39,95	107,04
7	2030	70,35	40,73	111,08
8	2031	73,71	41,51	115,23
9	2032	77,20	42,29	119,49
10	2033	80,81	43,07	123,87
11	2034	84,54	43,84	128,38
12	2035	88,39	44,62	133,01
13	2036	92,38	45,40	137,78
14	2037	96,50	46,18	142,68
15	2038	100,76	46,96	147,72
16	2039	105,17	47,74	152,90
17	2040	109,72	48,51	158,23
18	2041	114,42	49,29	163,71
19	2042	119,28	50,07	169,35
20	2043	124,30	50,85	175,15
21	2044	129,49	51,63	181,11
22	2045	134,84	52,40	187,25

23	2046	140,38	53,18	193,56
24	2047	146,09	53,96	200,05
25	2048	151,99	54,74	206,73

Fuente: Estudio cierre técnico segunda etapa GADMFO, 2022.

Considerando que no todos los residuos sólidos generados son recolectados debido a que los generadores domiciliar del área rural entierran o queman los residuos por esa razón los residuos recolectados serán dispuestos en una celda emergente, dado que el botadero se realizará el cierre técnico. En la tabla siguiente se presenta la proyección de los residuos RSU recolectados.

Tabla 58. Proyección de los residuos sólidos urbanos recolectados del cantón Francisco de Orellana

No.	Año	Residuos cantón domiciliar (ton/día)	Residuos no domiciliar (ton/día)	Total (ton/día)
-	2022	38,60	34,51	73,11
0	2023	40,78	35,29	76,07
1	2024	43,67	36,06	79,73
2	2025	46,41	36,84	83,26
3	2026	49,29	37,62	86,91
4	2027	52,29	38,40	90,69
5	2028	55,44	39,18	94,62
6	2029	58,73	39,95	98,68
7	2030	62,17	40,73	102,90
8	2031	65,76	41,51	107,27
9	2032	69,51	42,29	111,80
10	2033	73,43	43,07	116,50
11	2034	77,53	43,84	121,37
12	2035	81,80	44,62	126,42
13	2036	86,26	45,40	131,66
14	2037	90,91	46,18	137,09
15	2038	95,77	46,96	142,72
16	2039	100,83	47,74	148,56
17	2040	106,11	48,51	154,62
18	2041	111,61	49,29	160,90
19	2042	117,34	50,07	167,41
20	2043	123,32	50,85	174,17
21	2044	129,49	51,63	181,11

22	2045	134,84	52,40	187,25
23	2046	140,38	53,18	193,56
24	2047	146,09	53,96	200,05
25	2048	151,99	54,74	206,73

Fuente: Estudio cierre técnico segunda etapa GADMFO, 2022.

Tabla 59. Producción Per-Cápita del cantón Francisco de Orellana

Población del cantón estimada al año 2022	Producción total domiciliaria (ton/día)	Producción total no domiciliaria (ton/día)	Producción total especial (ton/día)	Producción total cantonal (ton/día)	Promedio PPC cantonal (kg/hab/día)
98530	49,27 58,67%	34,51 41,10%	0,195 0,23%	83,97 100%	0,852

Fuente: Estudio de caracterización RSU, cantón Francisco de Orellana GADMFO, 2022.

De igual modo, se determinó el potencial de aprovechamiento de los residuos y desechos sólidos caracterizados para cada fuente de generación a nivel cantonal, como se muestra en la Tabla 61.

Tabla 60. Composición según potencial de aprovechamiento RSU, cantón Francisco de Orellana

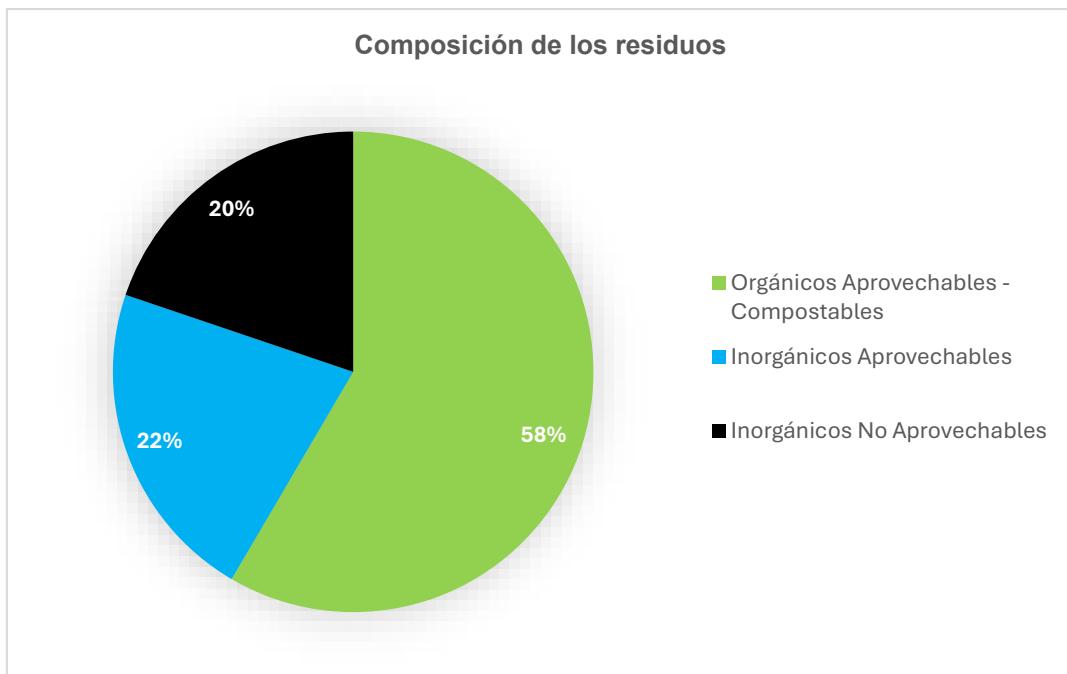
Fuentes de generación de residuos y desechos sólidos	Orgánicos Aprovechables - Compostables	Inorgánicos Aprovechables	Desechos no peligrosos	Total, %
Urbana (URB)	67,29 %	12,44 %	20,26 %	99,99 %
Rural (RUR)	63,31 %	17,36 %	19,32 %	99,99 %
Establecimientos Comerciales (EC)	32,74 %	38,79 %	28,47 %	100 %
Hoteles (H)	59,38 %	20,72 %	19,90 %	100 %
Mercados (M)	67,94 %	18,97 %	13,08 %	99,99 %
Instituciones Públicas y Privadas (IPP)	20,83 %	44,28 %	34,89 %	99,99 %
Instituciones Educativas (IE)	18,63 %	55,36 %	26,01 %	100 %
Restaurantes (R)	75,71 %	9,28 %	15,01 %	100 %
Industriales y Gestoras Ambientales (IGA)	Del proceso de muestreo De los permisos de ingreso	32,69 % 0,08 %	33,47 % ---	33,84 % 99,92 %
Aseo y Limpieza de Espacios Públicos y Calles (AL)	71,60 %	10,25 %	18,15 %	100 %

Fuente: Estudio de caracterización RSU, cantón Francisco de Orellana GADMFO, 2022.

De la caracterización de los residuos realizado el cantón Franciscos de Orellana en el 2022, presento la siguiente composición el 58 % corresponden a residuos orgánicos

compostables, el 22 % son residuos inorgánicos que se pueden aprovechar, mientras que el 20 % son residuos no aprovechables (Desechos), como se observa en la figura 7.

*Figura 7. Composición de los residuos RSU cantón Francisco de Orellana 2022*



*Imagen 13. Caracterización de los residuos sólidos urbanos RSU del cantón Francisco de Orellana*



*Fuente: Estudio de caracterización RSU, cantón Francisco de Orellana GADMFO, 2022.*

#### 4.3.3 Composición de los residuos sólidos urbanos cantón Loreto

El cantón Loreto en el 2023 genero 19,39 ton/día. De este total, el 74,88 % corresponde a la producción domiciliaria, el 24,83 % a la producción no domiciliaria y el 0,29 % a la generación de desechos comunes provenientes de fuentes especiales. La producción per cápita (PPC) del cantón para dicho año fue de 0,69 kg/hab/día, como se detalla en la Tabla 62.

*Tabla 61. Proyección de los residuos sólidos urbanos generados en el cantón Loreto*

Año	Residuos domiciliar (ton/día)	Residuos no domiciliar (ton/día)	Total, residuos generados en el cantón (ton/día)
2023	14,56	4,83	19,39
2024	14,97	4,90	19,87
2025	15,39	4,96	20,35
2026	15,82	5,03	20,85
2027	16,25	5,10	21,35
2028	16,70	5,17	21,87
2029	17,16	5,23	22,39
2030	17,62	5,30	22,92
2031	18,10	5,37	23,46
2032	18,58	5,44	24,02
2033	19,07	5,50	24,58
2034	19,58	5,57	25,15
2035	20,09	5,64	25,73
2036	20,62	5,71	26,33
2037	21,15	5,77	26,93
2038	21,70	5,84	27,54
2039	22,26	5,91	28,17
2040	22,83	5,98	28,81
2041	23,41	6,04	29,46
2042	24,00	6,11	30,12
2043	24,61	6,18	30,79
2044	25,23	6,25	31,47
2045	25,86	6,31	32,17
2046	26,50	6,38	32,88
2047	27,15	6,45	33,60
2048	27,82	6,52	34,34

*Fuente: Estudio y Diseño GIRS GADML, cantón Loreto, 2024*

De igual modo, no todos los residuos generados son recolectados, debido a las condiciones previamente expuestas. Se realizó además la proyección de los residuos recolectados en un periodo de 25 años.

*Tabla 62. Proyección de los residuos sólidos urbanos recolectados en el cantón Loreto*

Año	Urbano domiciliar (ton/día)	Rural domiciliar (ton/día)	No domiciliares (ton/día)	Total, residuos recolectados (ton/día)
2024	2,90	5,35	4,90	13,15
2025	2,99	5,57	4,96	13,52
2026	3,07	5,81	5,03	13,90
2027	3,15	6,05	5,10	14,30
2028	3,24	6,29	5,17	14,70
2029	3,33	6,55	5,23	15,11
2030	3,42	6,81	5,30	15,53
2031	3,51	7,09	5,37	15,97
2032	3,60	7,37	5,44	16,41
2033	3,70	7,66	5,50	16,86
2034	3,80	7,96	5,57	17,33
2035	3,90	8,27	5,64	17,80
2036	4,00	8,58	5,71	18,29
2037	4,10	8,91	5,77	18,79
2038	4,21	9,25	5,84	19,30
2039	4,32	9,60	5,91	19,82
2040	4,43	9,96	5,98	20,36
2041	4,54	10,32	6,04	20,91
2042	4,66	10,70	6,11	21,47
2043	4,77	11,09	6,18	22,05
2044	4,89	11,50	6,25	22,64
2045	5,02	11,91	6,31	23,24
2046	5,14	12,34	6,38	23,86
2047	5,27	12,78	6,45	24,50
2048	5,40	13,23	6,52	25,14

*Fuente: Estudio y Diseño GIRS GADML, cantón Loreto, 2024*

*Tabla 63. Producción Per-Cápita PPC del cantón Loreto*

Población Estimada 2023	Producción Total, Domiciliaria (Ton/día)	Producción Total No Domiciliaria (Ton/día)	Producción Total Especial (Ton/día)	Producción Total Cantonal (Ton/día)	Promedio PPC Cantonal (Ton/día)
28108	14,56	4,83	0,06	19,45	0,69

*Fuente: Estudio de caracterización de residuos sólidos urbanos cantón Loreto GADMCL, 2024*

La composición de los residuos sólidos urbanos del cantón Loreto que se pueden aprovechar por cada fuente de generación a nivel cantonal se muestra en la Tabla 65.

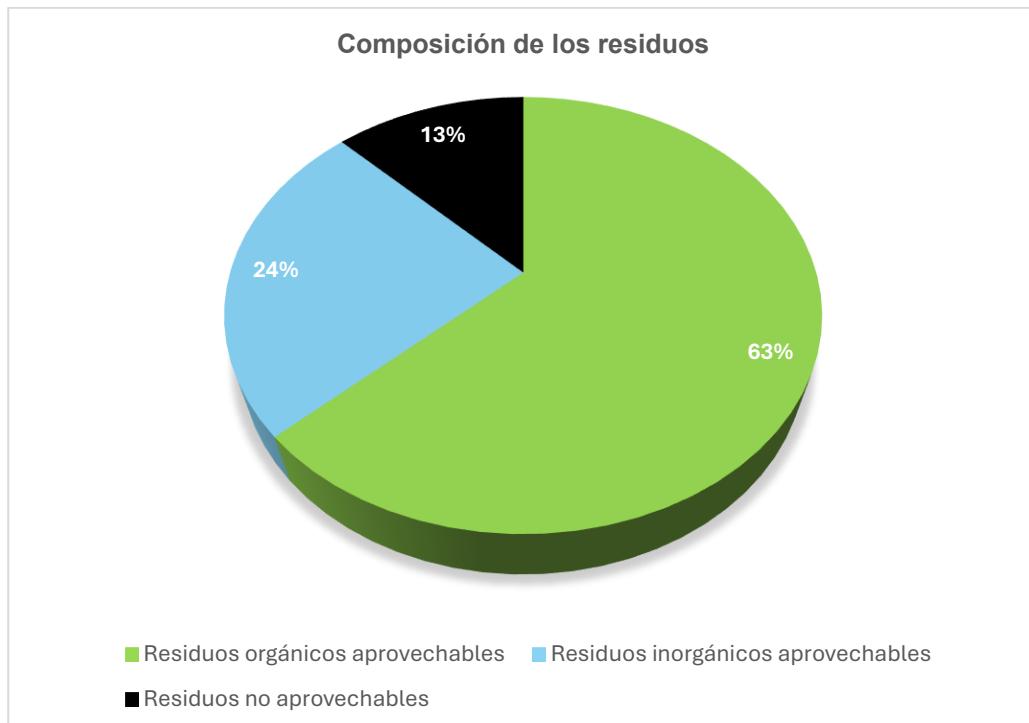
*Tabla 64. Composición según potencial de aprovechamiento de los residuos y desechos sólidos caracterizados en el Cantón Loreto.*

Fuentes de generación de residuos y desechos sólidos	Residuos orgánicos aprovechables Compostables	Residuos inorgánicos aprovechables	Residuos no aprovechables	Total porcentual
Urbanos (UR)	74,27%	18,16%	7,57%	100%
Rurales (RU)	45,73%	30,01%	24,26%	100%
Establecimientos comerciales (EC)	56,99%	33,87%	9,14%	100%
Hoteles (H)	54,55%	28,84%	16,62%	100%
Mercados (M)	92,91%	5,22%	1,87%	100%
Restaurantes (R)	78,69%	13,45%	7,86%	100%
Instituciones públicas y privadas (IPP)	41,24%	38,78%	19,98%	100%
Instituciones educativas (IE)	44,93%	38,08%	16,99%	100%
Barrido y limpieza de calles y espacios públicos (BL)	81,22%	15,85%	2,92%	100%
Especiales públicos y privados (ES)	25,92%	37,93%	36,15%	100%

*Fuente: Estudio de caracterización de residuos sólidos urbanos cantón Loreto GADMCL, 2024*

Del análisis de la composición de los residuos sólidos, se determinó que el 63 % corresponden a residuos orgánicos compostables, el 24 % son residuos inorgánicos que se pueden aprovechar, mientras que el 13 % son residuos no aprovechables (Desechos). En la figura 8 se observa la composición de los RSU.

*Figura 8. Composición de los residuos RSU cantón Loreto 2023*



*Imagen 14. Caracterización de los residuos del cantón Loreto*



*Fuente: Estudio de caracterización de residuos sólidos urbanos cantón Loreto GADMCL, 2024*

#### **4.3.4 Composición de los residuos sólidos urbanos cantón Santa Cruz**

Por último, en el cantón Santa Cruz en 2024, se han dispuesto en el relleno sanitario 19,0 ton/día, cuentan con un sistema de gestión integral de residuos sólidos. En este, se realiza la separación en la fuente de residuos reciclables, residuos orgánicos y desechos no reciclables. De acuerdo con el estudio de caracterización realizado en 2015, se ha determinado una producción per cápita (PPC) doméstica de 0,762 kg/hab/día y una PPC asociada de 0,149 kg/hab/día. En la Tabla 66, se presenta la PPC según el tipo de usuario.

*Tabla 65. Producción Per-Cápita PPC del cantón Santa Cruz*

Población estimada 2019	Doméstico Kg/ha b*día	Comercial Kg/hab*día	Institucional Kg/hab/día	Restaurantes Kg/hab/día	Hotels Kg/ha b/día	Embarcaciones Kg/hab/día	Cantonal Kg/hab/día
19.852,00	4,117	0,355	0,007	0,092	0,017	0,009	0,911

*Fuente: Plan de Gestión Integral del cantón Santa Cruz, 2023*

La composición de los residuos sólidos domiciliarios corresponde a un 14,75 % residuos reciclables, 66,95 % de residuos orgánicos, 13,59 % de desechos no reciclables, 455 % de residuos voluminosos y 0,16 % de residuos hospitalarios, como se detalla en la Tabla 67.

*Tabla 66. Composición física de los residuos sólidos del cantón Santa Cruz*

Descripción	Residuos Domiciliar % en Peso	Comercial % en Peso	Industrial % en Peso	Establecimiento Salud % en Peso	Culto Religioso % en Peso	Entidades oficiales % en Peso
Materia Orgánica	56,45	14,12	-	24,49	5,47	11,51
Papel y cartón	4,96	30,32	61,34	19,99	8,44	32,70
Metales ferrosos	0,38	--	--	--	--	--
Metales no ferrosos	1,55	--	--	--	--	--
Plástico baja densidad	5,30	8,99	4,47	18,65	5,10	8,72
Plástico de alta densidad PHDE	3,59	8,36	7,13	6,34	0,25	10,32
Caucho	1,73	2,36	--	-	6,45	--
Materia Inerte	4,48	19,36	--	1,72	13,18	13,68
Vidrio	3,74	4,23	4,04	7,40	7,16	13,27
Madera	0,98	1,66	5,78	--	--	--
Textiles	2,76	1,39	1,53	3,75	34,79	--
Papel higiénico, pañales, toallas	10,83	7,76	13,70	8,42	14,57	9,20
Tetrapak	1,24	0,13	--	0,98	--	0,06
Plásticos PET	1,19	1,33	2,00	8,19	4,58	0,54
Desechables (platos, vasos)	0,72	--	--	0,08	--	--
Pilas	0,09	--	--	--	--	--

*Fuente: Plan de Gestión Integral del cantón Santa Cruz, 2023*

*Tabla 67. Proyección de cantidad de residuos recolectada en el cantón Santa Cruz*

Año	Población	Población turística	Población Total	PPC (kg/hab/día)	Total, Generado (ton/día)
-----	-----------	---------------------	-----------------	------------------	---------------------------

2024	22142	1973	24115	0,876	21,14
2025	22617	2082	24699	0,879	21,70
2026	23098	2170	25268	0,881	22,26
2027	23582	2290	25872	0,883	22,85
2028	24073	2400	26473	0,885	23,44
2029	24571	2521	27092	0,887	24,04
2030	22141	2663	24804	0,890	22,07

*Fuente: Actualización de los Diseños Definitivos Fase II del Relleno Sanitario del cantón Santa Cruz (Castillo, 2020).*

#### **4.4 Evaluación del servicio público de gestión integral de los residuos sólidos urbanos**

##### **4.4.1 Aspecto técnico**

Se evaluaron 46 disposiciones para la selección del sitio de disposición final y la gestión integral de los residuos sólidos GIRS de cada cantón, de ahí que el Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del cantón Loreto (GADMCL) presenta 41,30 % de Conformidad C, el 28,26 % de No Conformidad Menor NC- y el 30,44 % de No Conformidad Mayor NC+, la no conformidad mayor corresponde al sistema de descarga de lixiviados a una propiedad privada sin autorización del propietario y fuera de los límites permisibles, no cuenta con un sistema de drenaje pluvial, ni drenaje para los lixiviados, en lo que corresponde a la GIRS, en la fase de separación en la fuente no se realiza la clasificación de los residuos sólidos por los generadores, en la fase de aprovechamiento existe la presencia de Recicladores que no cuentan con un área para realizar el aprovechamiento de los residuos reciclables de forma segura y saludable para los recicladores, no se realiza el tratamiento de los residuos orgánicos en la fase de disposición final, no se realiza una cobertura diaria de las celdas lo que genera la presencia de vectores como gallinazos.

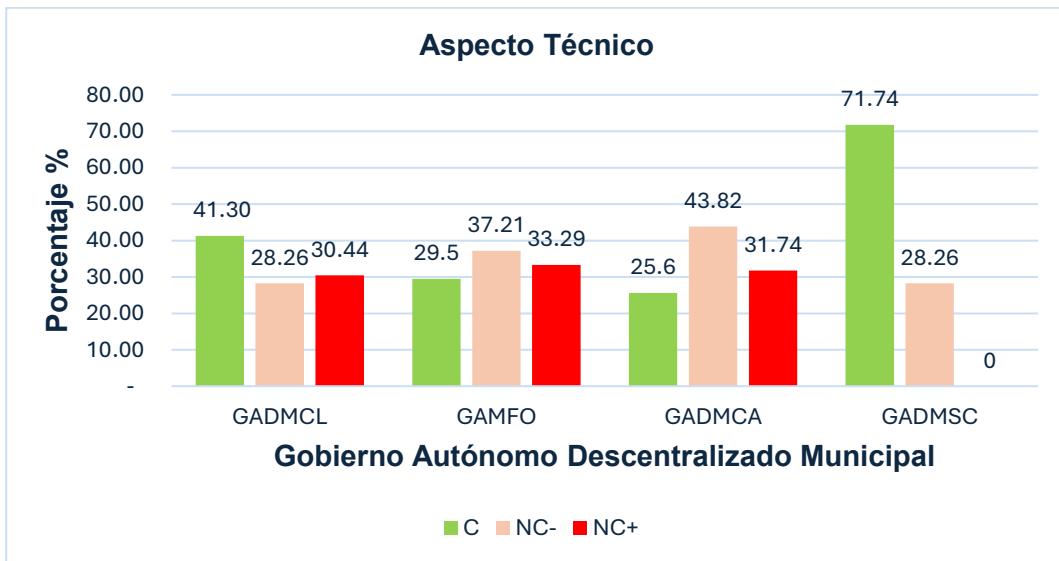
Por otro lado el Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del cantón Francisco de Orellana (GADMFO), presenta el 29,5 % de Conformidad C, 37,21 % de No Conformidad Menor NC-, y el 33,29 % de no conformidad Mayor NC+, la no conformidad mayor es en la selección del sitio de disposición final en lo que corresponde a la morfología del terreno a la presencia de capas freáticas lo que dificulta la construcción de las celdas de disposición final, no cuenta con un sistema de drenaje fluvial, ni drenaje para los lixiviados lo que ocasiona que los esteros existen en el sitio de disposición final se altere la calidad del agua, así mismo en la GIRS en la fase de separación en la fuente no se realiza la clasificación de los residuos sólidos por los generadores, en la fase almacenamiento no se realiza el mantenimiento de las papeleras ubicadas en los parques públicos alternando la calidad paisajística del área, en la fase de barrido y limpieza no se realiza la poda de los

árboles, limpieza de la maleza en las vías principales, en la fase de recolección no se realiza en los horarios establecidos, ocasionando que los residuos sean derramados en las aceras, vías a causa de los perros callejeros, en la fase de transporte falta de mantenimiento preventivo de los vehículos recolectores lo que genera la acumulación de los residuos en el cantón, en la fase de aprovechamiento no se realiza el reciclaje de los residuos reciclables, no se realiza el tratamiento de los residuos orgánicos, en la fase de disposición final no se cuenta con celdas técnicamente construidas, no se realiza el tapado diario de la celda, generando la presencia de vectores como moscas, gallinazos y la generación de olores causando molestias al área de influencia directa.

Igualmente, en lo que corresponde Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del cantón Aguarico (GADMCA), presenta el 25,60 % de Conformidad C, el 43,82 % de No Conformidad Menor NC- y el 31,74 % de No Conformidad Mayor NC+, la no conformidad mayor corresponde a que no cuentan con un sitio de disposición final según visita realizada y en base a la entrevista realizada al Sr. Franklin Cox ex autoridades del cantón. Se observó en el 2023 que el cantón cuenta con un área de disposición final donde actualmente, se encuentra abandonada, los residuos están dispersos no existe un cierre técnico del área de disposición final, no se realizó la verificación del cumplimiento del sistema de gestión integral debido a que el Gobierno Municipal no autorizo dado que se encuentran dentro de un proceso legal.

En lo que corresponde al Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del cantón del cantón Santa Cruz (GADMSC) de la evaluación realizada presenta 71,74 % de Conformidad C, 43,82 % de No Conformidad Menor NC- y el 0,00 % de No Conformidad Mayor NC+. La no conformidad menor corresponde a la fase de disposición final, en la visita de campo se observó que el tratamiento de los residuos orgánicos, no se realiza de manera técnica, existe derrame de percolado en el área de tratamiento de los orgánicos, presencia de vectores, moscas y gatos, la evaluación de los aspectos técnicos se muestra en la Figura 9.

*Figura 9. Evaluación del aspecto ambiental*



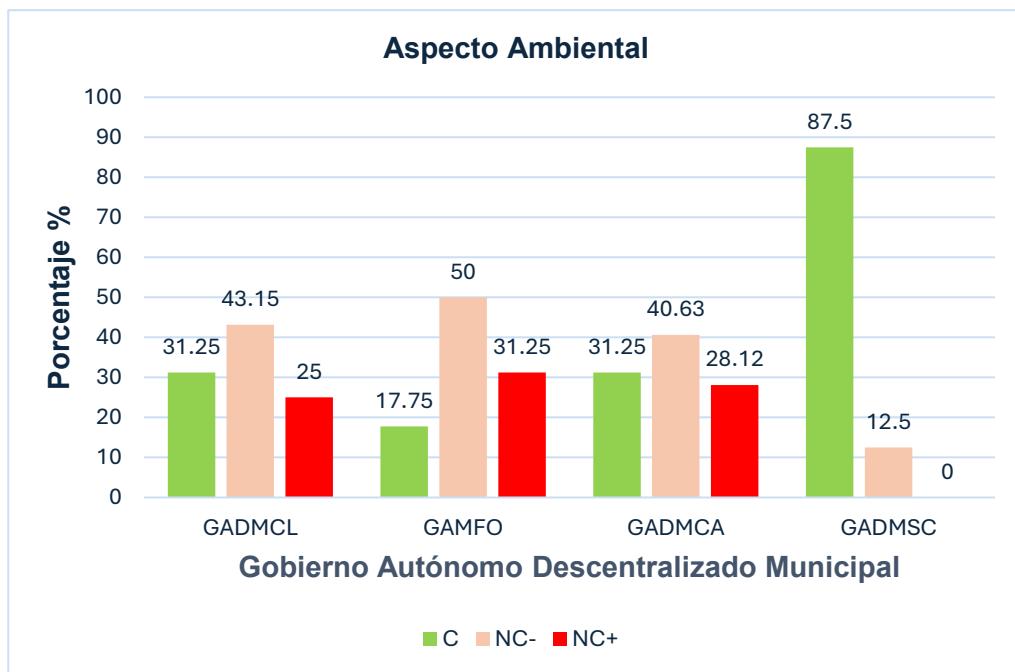
#### 4.4.2 Aspecto ambiental

Se evaluaron 32 aspectos ambientales dispuestos en el marco regulatorio donde el GADMCL, presenta 31,25 % de Conformidad C, 43,15 % de No Conformidad Menor NC-, 25 % de No Conformidad Mayor NC+, la no conformidad mayor corresponde a la descarga agua de la planta de tratamiento de lixiviados fuera de los límites permisibles establecidos en el Acuerdo Ministerial 097 A, Anexo 1, Tabla 9. Límites de descarga aun cuerpo de agua dulce, al predio colindante al sitio de disposición final, los parámetros que se encuentra fuera de los límites permisible corresponde a Cianuros Total, coliformes fecales, Demanda Química de Oxígeno DQO, Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO, Fenoles, Fosforo Total, Nitrógeno Total, Nitrógeno Amoniacal, Sólidos Totales, Sólidos Totales Suspendedos y Tensoactivos según Informe de Laboratorio No. 20426 a AQLAB. El GADMFO presenta el 17,25 % de Conformidad C, el 50 % de No Conformidad Menor NC- y el 31,25 % de No Conformidad Mayor NC+, es debido que la descarga de agua de la planta de tratamiento lixiviados algunos parámetros se encuentran fuera de los límites permisibles en los parámetros Demanda Química de Oxígeno DQO, Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO, Sólidos Totales ST, Sólidos Totales Suspendedos SST, Tensoactivos, Coliformes fecales, Hierro Total Fe, Magnesio Total Mg, Nitrógeno Total, Nitrógeno Amoniacal, según Informe de Laboratorio No. 20405 b AQLAB, alterando la calidad de agua de los esteros existentes en el sitio de disposición final así como en los predios colindantes del sitio de disposición final.

Por otro lado, GADMCA el 31,25 % es Conformidad C, 40,63 % No Conformidad Menor NC- y el 28,12 % No Conformidad Mayor NC+, la no conformidad mayor corresponde a

que el cantón actualmente no cuenta con sitio de disposición final, no existe un planta de tratamiento de lixiviados, el anterior sitio de disposición final se encuentra abandonado no se ha realizado el cierre técnico del sitio de disposición final lo que estaría ocasionado que los lixiviados producto de la descomposición de los residuos sólidos del cantón alteran la calidad del agua de los esteros aledaños, así como la calidad del agua del Río Napo así como a los afluentes al Río Yasuní que se encuentra dentro de una área protegida. Así mismo de la evaluación realizada al GADMSC el 87,50 % de Cumplimiento C, el 12,50% de No Conformidad Menor NC- y el 0,00 % de No Conformidad Mayor NC+, La no conformidad menor es debido a que en la fase de disposición final, no se realiza el tratamiento de los residuos orgánicos de manera técnica, el área no cuenta con canales perimetrales derramando percolado en el sitio, los resultados de la evaluación de los aspectos ambientales se detallan en la Figura 10.

*Figura 10. Evaluación del aspecto ambiental*

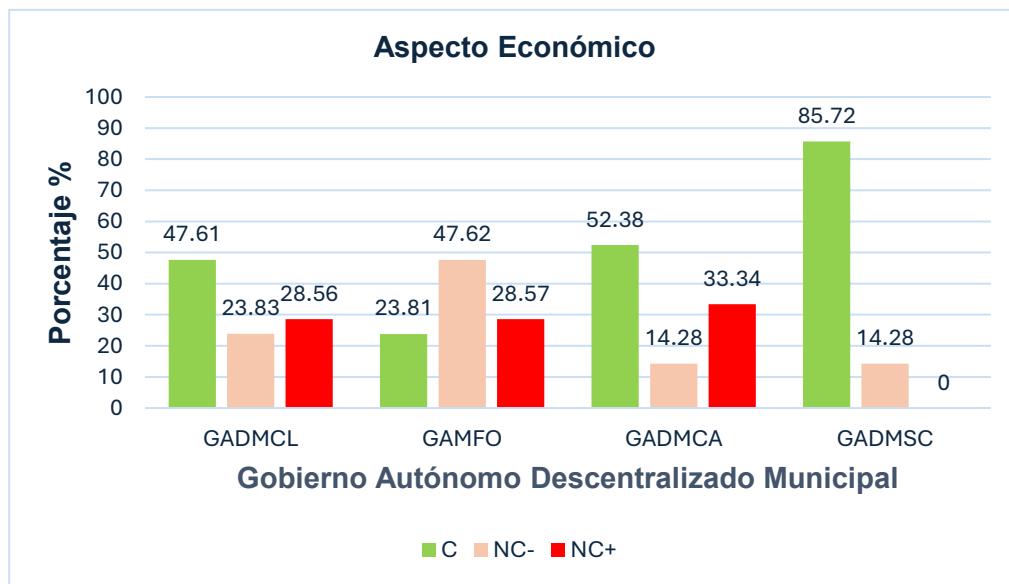


#### 4.4.3 Aspecto Económico

Así mismo se evaluaron 21 aspectos económicos donde el GADMCL, presenta 47,61 % de Conformidad C, 23,83 % No Conformidad Menor NC-, 28,56 % de No Conformidad Mayor NC+, el GADMFO presenta 23,81 % de Conformidad C, 47,62 % de No conformidad Menor NC-, el 33,34 % de No Conformidad Mayor NC+, de igual manera el GADMCA presenta 52,38 % Conformidad C, 14,28 % de No Conformidad Menor NC-, 33,34 % de No Conformidad Mayor NC+, así mismo el GADMSC presenta el 85,72 % de Conformidad, 14,28 % de No Conformidad Menor NC- y el 0,00 % de No Conformidad Mayor NC+, la no

conformidad mayor corresponde a que no se destina presupuesto para la gestión integral de los residuos sólidos por parte de los Gobiernos Municipales de manera oportuna lo que ocasiona que no se realice el mantenimiento de los vehículos, el cierre técnico de las celdas, mantenimiento de las celdas diarias y la adquisición de material de cobertura para el tapado diario de las celdas los resultados de la evaluación se muestran en la Figura 11.

*Figura 11. Evaluación del aspecto económico*



#### 4.4.4 Aspecto Social

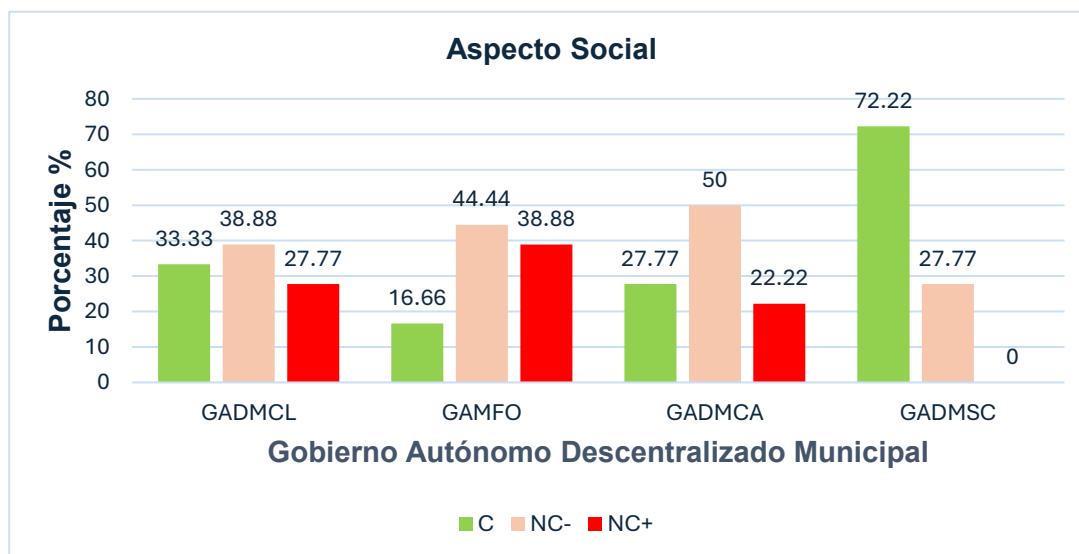
De la evaluación realizada en el aspecto social, se evaluaron 18 medidas donde el GADMCL presentó 30,05 % Conformidad C, 25.77 % No Conformidad Menor NC- 44,18 % de No Conformidad Mayor NC+, la no conformidad mayor es debido a la afectación a las propiedades colindantes por la descarga de agua de la planta de tratamiento de lixiviados, sin autorización y fuera de los límites permisibles y por los ciudadanos del cantón por la descarga de agua en el Río Suno han presentado una denuncia ante el Consejo de la Judicatura donde mediante Juicio Especial No. 22303202300134 de agosto 2023, la sala multicompetente del corte provincial de justicia de Orellana, una vez determinado que el GADMCL, ha vulnerado los derechos constitucionales del Ecuador ha dictado sentencia, para el cierre técnico del sitio de disposición final de los residuos y la implementación de un relleno sanitario que cumpla con las especificaciones técnicas dispuesta por el órgano rector.

De manera semejante el GAMFO presentó el 16,22 % de Conformidad C, 32,33 % de No Conformidad Menor NC- y el 49,45 % de No Conformidad Mayor NC+, la no conformidad mayor corresponde al malestar de la población del área de influencia directa debido a que el proyecto no fue socializado y dentro del estudio aprobado por el MAATE no se ha

identificado claramente el área de influencia directa de cada uno de los componentes ambientales como biótico, abiótico y social, así mismos debido a que existe descarga de agua de la planta de tratamiento de lixiviados que se encuentran fuera de los límites permisibles ocasionado la alteración de la calidad de agua de los esteros que se son utilizados por la comunidad como bebedero para el ganado y actividades agrícolas. Cuentan con una celda para la disposición final de los residuos sólidos, pero no se encuentra operativa debido a que existe fallas geológicas en el área y presencia de afloramiento de agua.

Igualmente, el GADMCA presentó el 18,20 % de Conformidad C, 29,65 % No Conformidad Menor NC- y el 52,15 % de No Conformidad Mayor NC+, así mismo la no conformidad mayor es debido que la Comuna Kichwa Pandochicta ha presentado una denuncia por la existencia de un botadero de basura y mediante Juicio No. 22U01202300094 de octubre 2023 la Unidad Judicial Especializada de Violencia Contra La Mujer o Miembros del Núcleo Familiar con Sede en el Cantón Francisco de Orellana, Provincia de Orellana ha dispuesto ejecute el cierre técnico definitivo y abandono del botadero de basura del territorio de la Comuna Kichwa Pandochicta en el plazo no superior a 9 meses así también se ejecutara la remediación ambiental integral. Finalmente, el GADMSC presenta 72,22 % de Conformidad C, el 27,77 % No Conformidad Menor NC- y el 0,00 % de No Conformidad Mayor NC+, la no conformidad menor es a causa de malestar por el cobro de la tarifa por la gestión de los residuos sólidos a través de fundas estandarizadas los resultados de la evaluación se muestran en la Figura 12.

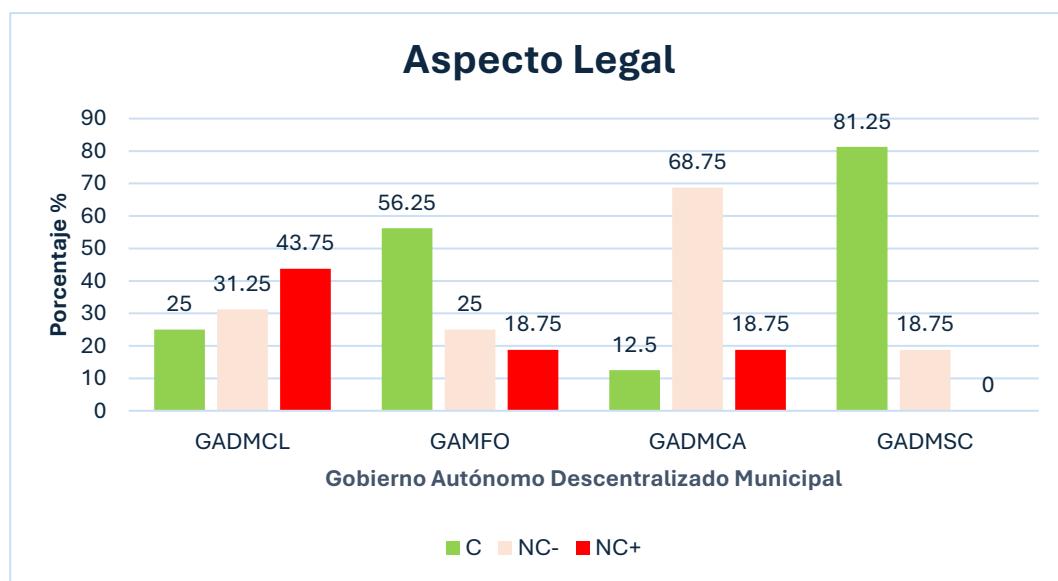
*Figura 12. Evaluación del aspecto ambiental*



#### 4.4.5 Aspecto Legal

Finalmente, en la Figura 11, se muestra la evaluación de las obligaciones a admirativas dispuestas por el MAATE, donde el GADMCL presentó 25,00 % de Conformidad C, 31,25 % de No Conformidad Menor NC- y el 43,75 % de No Conformidad Mayor NC+, el GADMFO el 56,25 % de Conformidad C, 25,00 % de No Conformidad Menor NC-, el 18,75 % de No Conformidad Mayor NC+, el GADMCA presentó 12,50 % de Conformidad C, 18,75 % de No Conformidad Menor NC-, 68,75 % de No Conformidad Mayor NC+, el GADMSC presentó el 87,78 % de Conformidad C, 12,22 % de No Conformidad Mayor NC-, del 0,00 % de No Conformidad Mayor NC+, la no conformidad mayor es causa de la falta de obtención de la viabilidad técnica para la gestión integral de los residuos y desechos sólidos no peligros GIRS dispuestos en el Código Orgánico del Ambiente COA, en el Reglamento al Código Orgánico del Ambiente RCOA, Artículos 566, 580, 582, 585, 587, Ley Orgánica de Economía Circular Inclusiva Artículo 33. Gestión integral de residuos enfocada al reciclaje inclusivo, Articulo. 43. Vinculación del reciclaje inclusivo con las fases de la gestión integral de residuos y el Reglamento General a la Ley Orgánica de Economía Circular Inclusiva, no cuentan con el Plan Nacional de Reducción de residuos Plásticos e incentivos al reciclaje. Así mismo, no cuentan con el Plan de gestión integral municipal de residuos y desechos no peligrosos y sanitarios (PGI), no presentan informes anuales de cumplimiento del PGI, no realizan las declaraciones anuales sobre la generación y gestión de residuos y desechos sólidos no peligrosos, no existe ordenanzas actualizadas, no cuentan con modelos de gestión, no se implementado las fases de gestión integral, no cuentan con los permisos ambientales, no realizan fortalecimiento al reciclaje inclusivo, no cuentan con plan de monitoreo para cada uno de los componentes ambientales.

Figura 13. Evaluación del aspecto legal



## **4.5 Estimación de la cantidad de biogás generado en los rellenos sanitarios**

Dado que los rellenos sanitarios Las Iguanas y Pichacay cuentan con un sistema de capacitación, se estimó la cantidad de biogás. De los rellenos sanitarios de Las Iguanas y Pichacay. A continuación, se detalla la cantidad de biogás generado.

### **4.5.1 Biogás generado en el relleno sanitario Las Iguanas**

El relleno sanitario Las Iguanas, se encuentra ubicado en el extremo noroeste de la ciudad de Guayaquil, a la altura del kilómetro 14,5 de la vía a Daule, ingresando 2,2 km por la avenida Doña Manuela Garaycoa de Calderón, actual calle 27 (N-O). Cuenta con un área aproximada de 231 hectáreas (ha). Morfológicamente, se encuentra subdividido en cuatro sectores de disposición de desechos, denominados sectores A, B, C y D, y dispone además de un área de expansión contigua al sector D, denominada sector E, con aproximadamente 110 hectáreas (ha). Inició su operación el 28 de septiembre de 1994. La información proporcionada corresponde al análisis de biogás analizado a continuación se detalla el análisis de biogás realizado desde el 2013 hasta 2021.

*Tabla 68. Análisis de biogás generado en el relleno sanitario Las Iguanas*

Parámetros	Unidad	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
		3OA 100713	3OA 160814	3OA 141215	3OA	3OA	3OA 231218	3OA 080619	3OA 260820	3OA 150221
NH3	%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0002	0,00	0,00	0,0001
CO	%	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,002	23,00	10,00	10
CO2	%	25,34	38,20	37,50	31,60	28,00	36,3	44,40	42,60	42,5
H2	%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,002	0,00	0,00	0,00
CH4	%	28,96	55,60	53,80	48,00	45,60	51,9	42,30	57,40	57,5
N2	%	33,37	4,50	6,00	17,50	18,30	8,9	22,90	0,00	0,00
O2	%	12,32	1,70	2,70	2,80	4,90	2,8	2,90	0,00	0,00
H2S	%	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,003	136,00	97,00	82,00

*Fuente: OFC. No. 034-2018 relleno sanitario Las Iguanas, 2018.*

Figura 14. Biogás generado en el relleno sanitario Las Iguanas

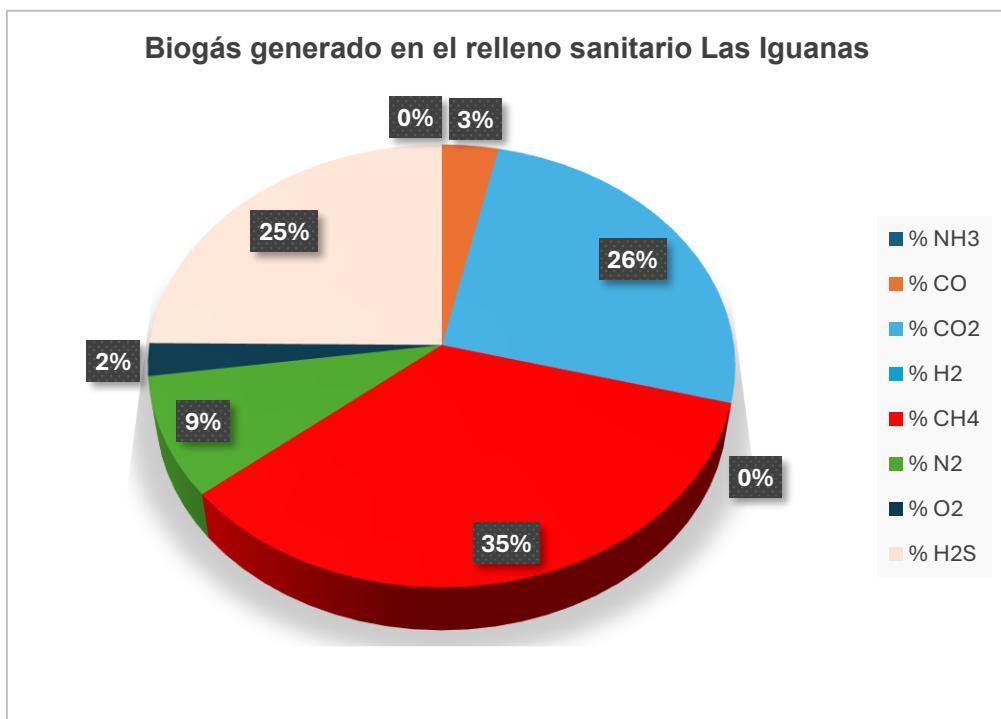


Imagen 15. Chimenea de biogás relleno sanitario Las Iguanas





c. Estación Meteorológica Las Iguanas

*Fuente: Visita técnica relleno sanitario Las Iguanas, 2021.*

#### 4.5.2 Biogás generado en el relleno sanitario Pichacay

El relleno sanitario Pichacay, está ubicado en la parroquia Santa Ana, a 21 km de Cuenca. Su operación inició en 2001, con una vida útil hasta 2031, en el 2012, se constituye la EMAC-BGP ENERGY CEM — EBE, compañía cargo del desarrollo, construcción y operación de la central "Pichacay", proyecto concebido para desarrollar una central para el aprovechamiento de biogás con una potencia 2 MW., ejecutada en dos etapas, cada una de 1 MW. Donde la generación mensual promedio con la primera unidad alcanza un valor de 520.000 kWh desde el 2017 al 2021, se entregado a la red pública 22.101 MWh., reduciendo aproximadamente 105.000 toneladas de CO<sub>2</sub>e. A continuación, se muestra el análisis de biogás realizado en el 2020 donde se puede observar el porcentaje de biogás generado. Por otro lado, en el 2024 se han dispuesto en el relleno sanitario 559 ton/día de residuos sólidos urbanos.

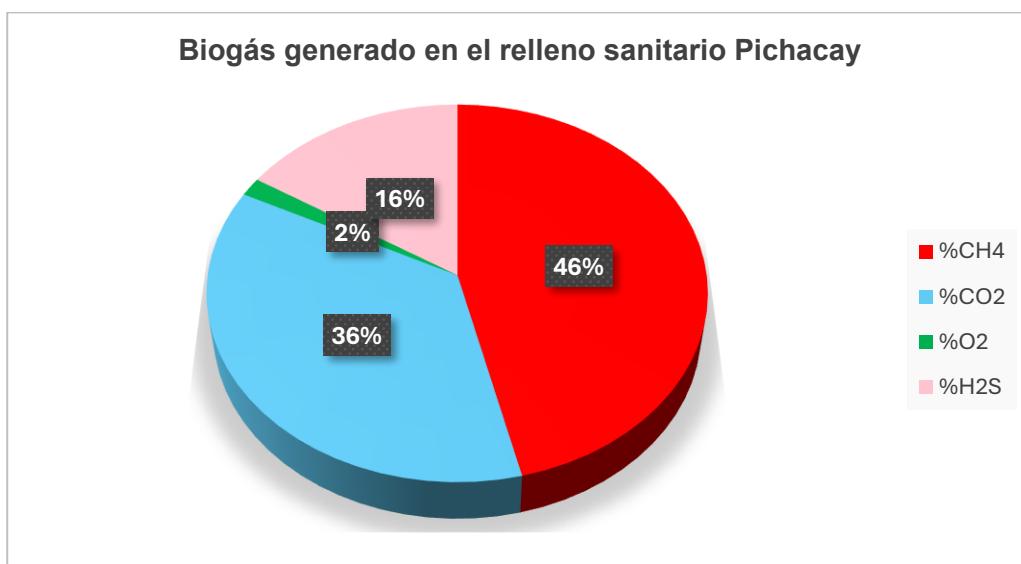
*Tabla 69. Análisis de biogás generado en el relleno sanitario Pichacay*

Pozos	Parámetro			
	%CH <sub>4</sub>	%CO <sub>2</sub>	%O <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub> S
1	54,5	45,5	0,0	37
2	55,8	44,2	0,0	63
3	55,4	44,2	0,0	16
4	51,9	37,9	2,5	27
5	55,7	44,1	0,0	24
6	56,2	43,9	0,0	31
7	58,6	41,5	0,0	20
8	42,6	30,0	5,7	13
9	36,8	28,5	6,4	11
10	55,1	44,8	0,2	29

11	54,2	42,7	0,0	20
12	54,4	45,7	0,0	11
13	54,8	45,2	0,0	39
14	53,6	46,4	0,0	21
15	53,8	46,1	6,0	6
16	56,4	43,0	0,5	13
17	45,00	37,1	0,9	1
18	55,5	44,2	0,0	24
19	55,4	44,5	0,0	13
20	56,5	43,1	0,5	11
21	57,2	40,7	0,9	4
22	54,0	45,9	0,0	18
23	56,0	43,7	0,0	3
24	56,3	43,1	0,8	33
25	56,2	43,2	0,5	15
26	25,3	19,1	10,7	2
27	49,1	36,4	3,2	1
28	45,2	33,1	4,8	10
29	45,4	35,0	3,6	6
30	55,4	44,0	0,7	33
31	51,6	38,5	2,4	2,6
32	33,9	26,1	6,0	12
BIO	51.493,75	40.356,25	1.7593,75	17,8

Fuente: Relleno sanitario Pichacay, 2021.

Figura 15. Biogás generado en el relleno sanitario Pichacay



#### **4.5.3 Estimación del biogás producido LandGEM versión 3.03**

El cantón Loreto en el 2024 generó 19,75 (ton/día) de residuos sólidos urbanos RSU de los cuales 13,75 (ton/día) son recolectadas. En consecuencia, la cantidad que ingresa al sitio de disposición final (celda emergente), corresponde a la cantidad recolectada. Por otro lado, el cantón Francisco de Orellana generó 88,45 (ton/día) de las cuales 79,73 (ton/día) son recolectadas y dispuestas en un botadero lo que dificulta la implementación de un sistema captación de biogás para el aprovechamiento de biogás a través de la generación de energía eléctrica. De la misma forma en el Gobierno Municipal del cantón Santa Cruz recolecta 21,14 (ton/día) de residuos que son ingresados al relleno sanitario. En consecuencia, debido a que para la implementación de un sistema captación de biogás se requiere un volumen mínimo 500 (ton/día) de residuos sólidos urbanos RSU, no resulta factible establecer dicho sistema en los sitios de disposición final de los cantones Loreto y Francisco de Orellana (celda emergente), así como en el relleno sanitario de Santa Cruz debido a la limitada cantidad de residuos dispuestos.

Lo que no sucede con los sitios de disposición final de los cantones Guayaquil y Cuenca que cuentan con rellenos sanitarios lo que permitió la implementación de sistemas de biogás Considerando que entre 2004 y 2020, se han depositado en el relleno sanitario de Pichacay un total de 2.131.077,23 toneladas, con un promedio mensual de 10.895,04 toneladas (RSU). Esto corresponde al 12,03 % de los residuos procedentes de los mercados, el 6,41 % de la industria, el 80,75 % de los hogares, el 0,32 % de residuos biológicos esterilizados, el 0,09 % de residuos orgánicos y el 0,39 % de residuos reciclados. Por otro lado, en el relleno sanitario de Las Iguanas, entre 1994 y 2020, se han depositado unas 28.714.041,14 toneladas de residuos, de las cuales el 92 % han sido residuos orgánicos y el 8 % residuos inertes, por lo que es factible la implementación de un sistemas de captación de biogás de ahí que se procede con la estimación de biogás debido a que la cantidad de residuos sólidos que ingresan a los rellenos sanitarios superan el volumen mínimo de residuos que son dispuestos [32].

De la estimación de biogás producido en los rellenos sanitarios de Pichacay y Las Iguanas, se utilizó el modelo de gases de vertedero LandGEM versión 3.03, en el que se consideraron el inicio 2004 y el cierre 2052, con un índice de generación de metano  $\text{CH}_4$ ,  $k = 0.05$  (1/año), generación potencial de metano  $L_0 = 170$  ( $\text{m}^3 / \text{Mg}$ ) y otros gases NMOC con una concentración de 600 ppm. Consideramos una concentración de  $\text{CH}_4$  del 56 % para el relleno sanitario de Pichacay y del 58 % para el relleno sanitario de Las Iguanas. Asimismo, con el fin de introducir la cantidad de RSU en el modelo, se realizó una proyección de la cantidad de RSU generada entre 2021 hasta 2052, en la que, para el

relleno sanitario de Pichacay, se consideró el PPC urbano de 0.47 (kg/hab./día), una población proyectada de Cuenca de 997.373 habitantes y una generación media anual de RSU de 12.925,337 (ton/año). Por otro lado, para el relleno sanitario Las Iguanas, se consideró un PPC de 1,56 (kg/hab./día), una población de Guayaquil de aproximadamente 3.231.735 habitantes y una generación media anual de RSU de 129.784,217 (ton/año).

Así pues, con la estimación del biogás, se calculó el volumen total de biogás, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> y NMOC en (m<sup>3</sup>/año), por lo que en el relleno sanitario de Pichacay se estima que el biogás total alcanzará su punto máximo un año después del cierre, es decir, en 2053, con 76.982,177 (m<sup>3</sup>/año). Posteriormente, disminuirá exponencialmente a medida que disminuya la cantidad de materia orgánica consumida hasta 2144, lo que generará 813,48 (m<sup>3</sup>/año) de biogás. En el caso del CH<sub>4</sub>, el volumen máximo se alcanzará dos años después del cierre, es decir, en 2054, cuando generará 41.007,519 (m<sup>3</sup>/año).

El volumen más alto de CO<sub>2</sub> se alcanzará en 2054 con 32.220,193 (m<sup>3</sup>/año) y el valor más alto de NMOC se alcanzará en 2053 con 46.189,306 (m<sup>3</sup>/año), como se ilustra en la figura 16. Del mismo modo, la cantidad total de biogás estimada para el relleno sanitario Las Iguanas alcanza su punto más alto en 2053 con 693.975,228 (m<sup>3</sup>/año), un año después del cierre del relleno sanitario. Posteriormente, disminuirá exponencialmente a medida que disminuya la cantidad de materia orgánica consumida hasta 2144, generará 416,385 (m<sup>3</sup>/año). En 2053, el valor más alto de CH<sub>4</sub> será de 402.505.632 (m<sup>3</sup>/año), el de CO<sub>2</sub> de 291.469.596 (m<sup>3</sup>/año) y el de NMOC con 416,385 (m<sup>3</sup>/año), como se muestra en las siguientes figuras.

*Figura 16. Predicción de la cantidad total de biogás del relleno sanitario Pichacay-Cuenca.*

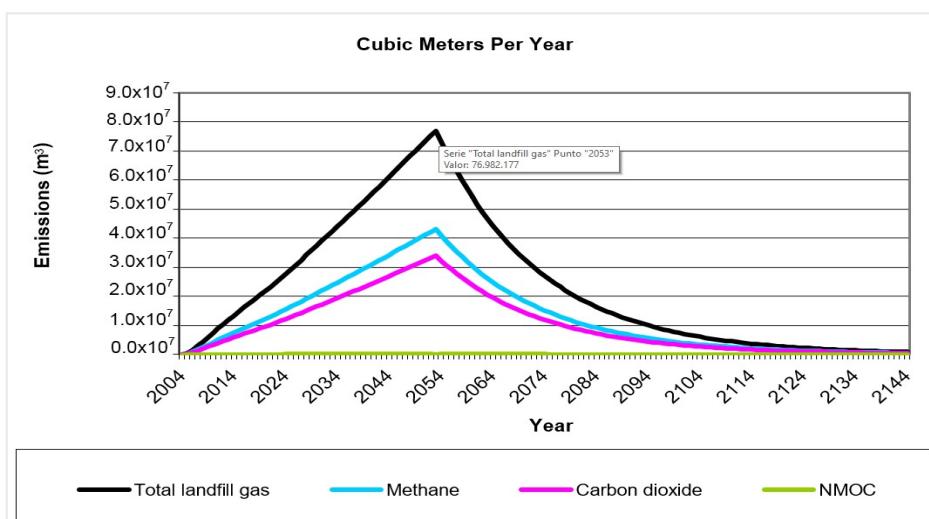
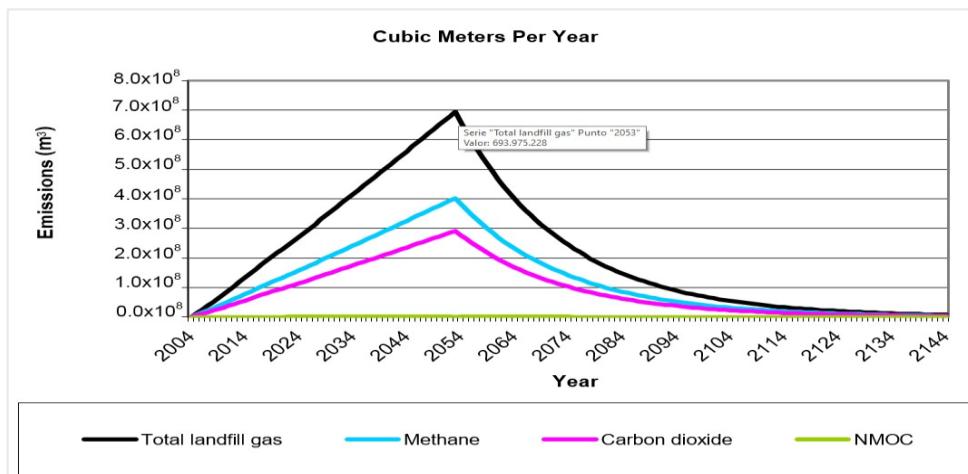


Figura 17. Predicción de la cantidad total de biogás del relleno sanitario Las Iguanas



#### 4.5.4 Producción estimada de electricidad a partir de biogás

Para determinar la cantidad de electricidad generada a partir del biogás (m<sup>3</sup>/año) y el número de hogares que se abastecerían con la cantidad de electricidad producida, se consideró el periodo comprendido entre 2021 y 2144. En el 2144 es el año estimado en el que el relleno sanitario dejaría de producir biogás, según los cálculos realizados aplicando las ecuaciones (25 y 46). Se aplicaron los factores de conversión mencionados anteriormente, dado que se estima que los rellenos sanitarios de Pichacay y Las Iguanas cerrarán en 2052. A efectos explicativos, se clasificó en dos grupos de análisis, el primero de los cuales abarcaba el periodo comprendido entre 2021 y 2052, y el segundo, entre 2053 y 2144. Así, en el primer grupo, la electricidad disponible a partir del biogás generado en el relleno sanitario de Pichacay en 2021 alcanza los 24.313.579,99 (kWh/año), lo que abastecería a 1.522 hogares, como se muestra en la figura 18. El segundo grupo corresponde al periodo comprendido entre 2053 y 2144. En 2053 se registra la mayor producción de energía, con 81.226.339,36 (kWh/año), lo que permitiría abastecer a 5.083 hogares dentro del área de influencia (figura 18).

Del mismo modo, la cantidad de electricidad generada en el relleno sanitario Las Iguanas en 2021 produce 229.272.368,53 (kWh/año), que es la cantidad de energía que se suministraría si se utilizara biogás para abastecer a 15.140 hogares del primer grupo. En el segundo grupo, en 2053, se alcanzará el punto máximo de energía con 732.235.296,74 (kWh/año), lo que permitiría suministrar electricidad a 45.825 hogares, como se muestra en la figura 19.

Figura 18. Grupo 1. Electricidad producida en Pichacay y número de viviendas abastecidas con energía en el período 2021-2052 [32].

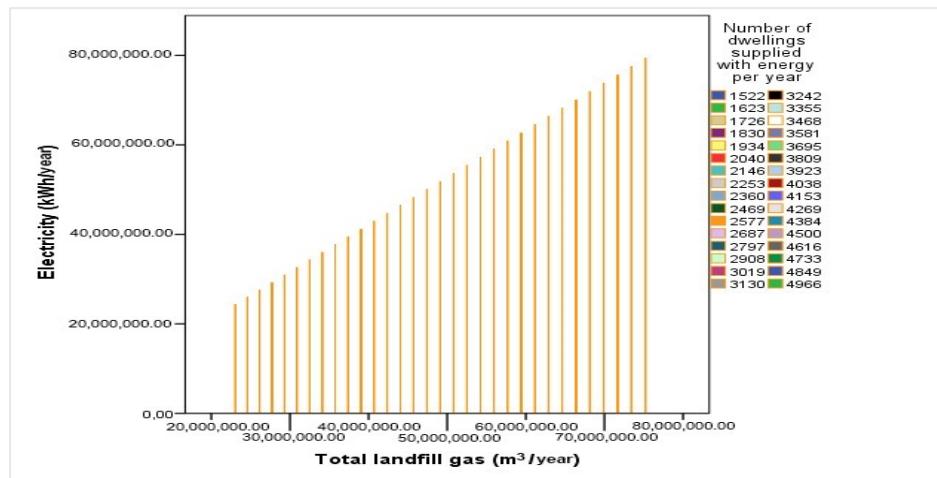
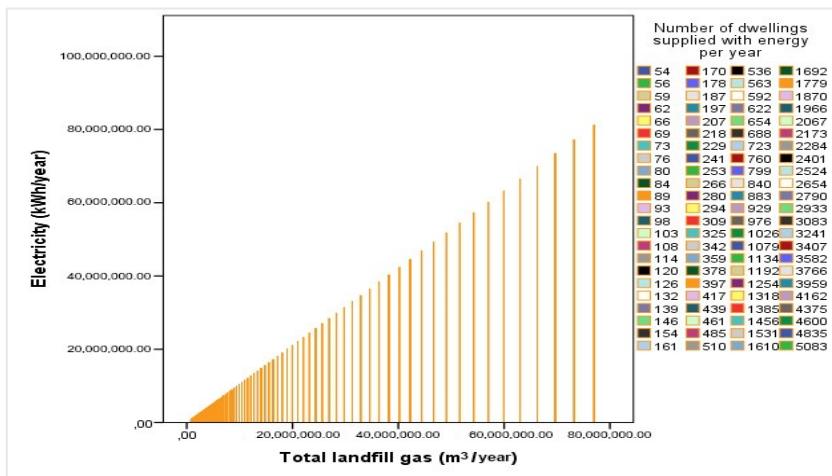


Figura 19. Grupo 2. Electricidad producida en Pichacay y número de viviendas abastecidas con energía en el período 2053-2144.



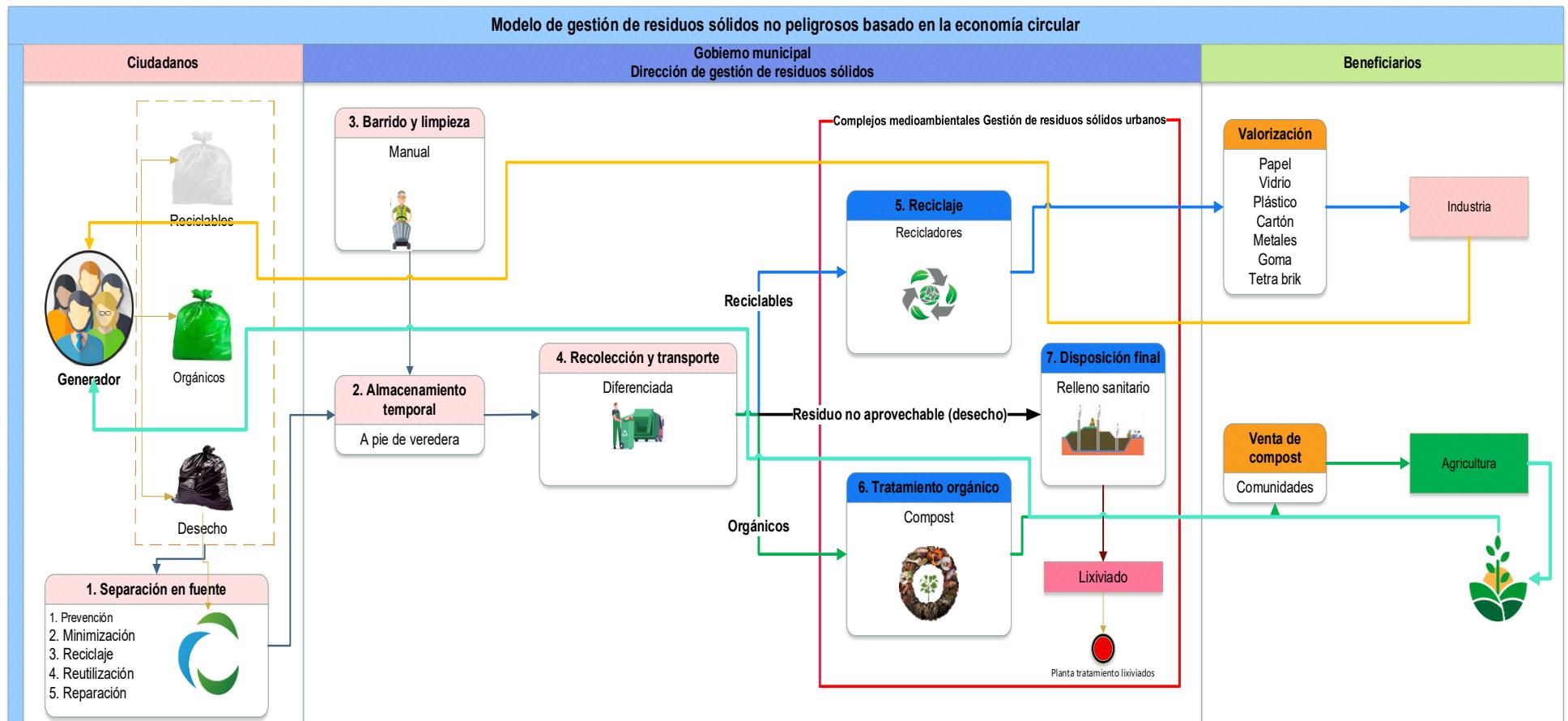
#### 4.6 Modelo tarifario del servicio de gestión integral de residuos sólidos urbanos

Dado que los 6 sitios de disposición final estudiados, los sitios de disposición del cantón Loreto, Francisco de Orellana, Aguarico y Santa Cruz, no cumplen con el volumen mínimo de residuos. Por otro lado, los cantones Loreto y Francisco de Orellana cuentan con una celda emergente para la disposición final de los residuos, el cantón Aguarico no cuenta con sitio para la disposición final de los residuos. Dado que los sitios de disposición no cumplen con los criterios técnicos para la implementación de un sistema de captación de biogás, se realizó un modelo de gestión para los residuos basados en el reciclaje y tratamiento de los orgánicos y la inclusión de los recicladores de base con énfasis en la economía circular.

De ahí que se realizó el análisis, económico y financiero para la implementación de un sistema de gestión integral de residuos sólidos del cantón Loreto. El análisis financiero y económico realizado, se consideró la normativa ambiental vigente como el Código Orgánico del Ambiente, en el artículo 27, establece las facultades de los Gobiernos Autónomo Descentralizados, en su numeral 6 establece elaborar planes, programas y proyectos para los sistemas de recolección, transporte, tratamiento y disposición final de residuos o desechos sólidos; y numeral 7 generar normas y procedimientos para la gestión integral de los residuos y desechos para prevenirlos, aprovecharlos, de ahí que la propuesta para el modelo de gestión se basa en lo dispuesto en el Reglamento General a La Ley Orgánica de Economía Circular Inclusiva, artículo. 22. De la jerarquización de los residuos.

Por otra parte para aprovechar los residuos reciclables y orgánicos y alargar la vida útil de la celda emergente, se consideró la gestión circular de los residuos y desechos priorizando el orden de jerarquización: 1. Prevención; 2. Minimización de la generación en la fuente: Ecodiseño, Servitización, Reutilización, Reparación, Restauración, Remanufacturar, Re proponer, 3. Aprovechamiento, reciclaje o valorización, 4. Recuperación energética, 5. Eliminación y 6. Disposición final a continuación se presenta en la Figura 20. La propuesta del Modelo de gestión se basó en economía circular.

Figura 20. Modelo de Gestión para los Residuos Sólidos No Peligrosos basado en Economía



Igualmente, se realizó el modelo tarifario considerando un sistema de normas y estructuras que se emplean para calcular el coste de un servicio, comúnmente utilizado por entidades gubernamentales, en este estudio se adoptaron los lineamientos establecidos por Corporación Nacional de Electricidad (CNEL - EP), debido a que permite incrementar el número de usuarios sujetos de cobro de las tasas por el servicio público de gestión integral de los residuos sólidos no peligrosos. Así mismo CNEL-EP ha establecido un sistema unificado para el cálculo de la tasa se utilizó la ecuación (47). A partir de los cálculos realizados se determinó la tarifa real por tonelada de disposición de residuos sólidos que es \$ 955 Ton/día. Esta tarifa refleja el efecto de las inversiones, así como su relación con los costos operativos del proceso de disposición final. Además, se estableció el valor por usuario, calculado en función del consumo de energía eléctrica, de acuerdo con los lineamientos definidos por CNEL EP para el cobro de la tasa por el servicio público de la gestión de residuos sólidos no peligrosos. Dicho calculo se realizó mediante la aplicación de la ecuación (47). A continuación, se detalla el resumen de los valores económicos a cancelar, determinados en función del consumo eléctrico.

*Tabla 70. Propuesta de modelo tarifario GIRS*

Descripción	Valor
Tarifa real por tonelada de disposición	\$955,84
Residencial 0 kwh	\$0,28
Residencial 25 kwh	\$1,00
Residencial 100 kwh	\$2,92
Residencial 130 kwh	\$4,59
Residencial 300 kwh	\$5,68
Residencial 700 kwh	\$9,83

Por otra parte, a partir del cálculo de los indicadores valor actual neto (VAN) y tasa interna de retorno financiero (TIR) aplicando las ecuaciones (48 y 49), se obtuvo un VAN de \$688.495,13 y TIR 9,61%. Estos resultados evidencian que la implementación del proyecto genera un beneficio financiero significativo equivalente de \$688.495,13, así como un retorno de inversión del 9,61%. En consecuencia, dichos indicadores reflejan la solidez económica del proyecto, atribuida a los beneficios derivados de la gestión integral de residuos sólidos no peligrosos. Este enfoque no solo optimiza los recursos, sino que también impulsa la sostenibilidad financiera al convertir la correcta gestión de residuos en una fuente de ingresos y ahorros. Por otro lado, a partir del cálculo del indicador beneficio costo (B/C) aplicando la ecuación (50), se obtuvo un B/C de \$1,50 lo que refleja alta rentabilidad del proyecto y evidencia su capacidad para generar un impacto financiero positivo y sostenible.

# **CAPÍTULO 5.**

## **CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO**

---

## **5 Capítulo 5. Conclusiones y trabajo futuro**

### **5.1 Conclusiones**

En conclusión, para estimar las emisiones de biogás producidos en los rellenos sanitarios del Ecuador y los beneficios económicos asociados, se realizó un levantamiento de información en campo mediante visitas técnicas, toma de muestras, monitoreos y aplicación de encuestas. Como resultado del análisis de la calidad del aire en el sitio de disposición final y en el área de influencia directa e indirecta de los cantones Loreto y Francisco de Orellana, se determinó que los parámetros CO, O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, PM10, PM2.5, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>, Cd, Hg, se encuentran dentro de los límites permisibles establecidos en la Tabla 1. Concentraciones de contaminantes criterio, que define los niveles de alerta, alarma y de emergencia en la calidad del aire, así como en la tabla 3. Niveles máximos permisibles para contaminantes no convencionales con efectos tóxicos y/o cancerígenos dispuestos en el Acuerdo Ministerial 097A, Anexo 4.

De igual forma, en la medición de olores (H<sub>2</sub>S), realizada en el cantón Loreto de los tres puntos analizados, el punto 2 y 3 presentaron valores inferiores al límite de referencia establecido, lo que evidencia que los niveles de exposición generan únicamente una percepción leve de olor.

Por otra parte, a partir de la caracterización de los residuos sólidos realizada en los cantones Loreto y Francisco de Orellana, se determinó que el cantón Francisco de Orellana, en el 2022, se generaron 82,08 (ton/día), de las cuales 79,73 (ton/día) fueron recolectados y dispuestos en un botadero. Además, La composición correspondió a 58% de residuos orgánicos compostables, 22 % de residuos reciclables aprovechables y el 20 % de residuos no aprovechables (desechos), una PPC de 0,852 (kg/hab/día).

Por su parte, el cantón Loreto en el 2024, se generaron 19,75 (ton/día) de residuos sólidos urbanos de los cuales 13,75 (ton/día) fueron recolectados y dispuestos en una celda emergente. La composición presentó un 24 % de residuos reciclables aprovechables, 63 % de residuos orgánicos compostables y el 13 % de residuos no aprovechables (desechos), con una PPC de 0,69 (kg/hab/día).

En el cantón Santa Cruz en el 2024, se recolectan 19,0 (ton/día) de residuos dispuestos en el relleno sanitario. Su composición correspondió a 14,75 % de residuos reciclables, 66,95 % de residuos orgánicos compostables, 13,59 % de residuos reciclables aprovechables, 4,55 % de residuos voluminosos y 0,16 % de residuos hospitalarios.

En igual forma, el cantón Guayaquil en el 2024, se dispuso en el relleno sanitario Las Iguanas 4.400 (ton/día) de residuos RSU, mientras que en el cantón Cuenca se dispusieron 559 (ton/día) de residuos en el relleno sanitario de Pichacay. En caso del cantón Aguarico, las autoridades no autorizaron el ingreso para el levantamiento de información.

De la evaluación realizada al servicio público de gestión integral de los residuos sólidos urbanos los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales de los cantones Loreto, Aguarico, Francisco de Orellana, presentaron no conformidades mayores (NC+), principalmente debido a la ausencia de rellenos sanitarios y a la operación de botaderos que generan descargas de lixiviados fuera de los límites establecidos, emisiones de olores desagradables y conflictos sociales con el área de influencia directa. Además, se evidenció la falta de asignación de recursos económicos por parte de las autoridades, no cuentan con el Plan Nacional de Reducción de residuos Plásticos e incentivos al reciclaje, así como el Plan de gestión integral municipal de residuos y desechos no peligrosos y sanitarios (PGI), se constató que no existe ordenanzas actualizadas, no se implementan modelos de gestión, no se realizan acciones de fortalecimiento del reciclaje inclusivo, no cuentan con plan de monitoreo para cada uno de los componentes ambientales.

En cuanto a la estimación de biogás, el relleno sanitario de Pichacay (Cuenca) presentó en 2021 un volumen máximo de 76.982,177 m<sup>3</sup>/año, con una fracción de CH<sub>4</sub> de 41.007,519 m<sup>3</sup>/año, equivalente a una generación de 24.313.579,99 kWh/año, suficiente para abastecer 1.522 hogares. En el relleno sanitario Las Iguanas (Guayaquil), el volumen máximo fue de 693.975,228 m<sup>3</sup>/año, con 402.505,632 m<sup>3</sup>/año de CH<sub>4</sub>, que produjeron 229.272.368,53 kWh/año, abasteciendo a 15.140 hogares.

En los cantones Loreto y Francisco de Orellana, al no cumplir con los criterios técnicos para el aprovechamiento del biogás, se propuso un modelo tarifario basado en el consumo de energía eléctrica, cuya recaudación se realizaría a través de la planilla de luz. La tarifa planteada para usuarios residenciales varía progresivamente entre \$ 0,28 y \$ 9,83 según el nivel de consumo. El análisis económico determinó un VAN de \$ 688.495,13 y una TIR del 9,61 %, lo que evidencia la viabilidad financiera del modelo y su potencial para generar beneficios sostenibles. Asimismo, se planteó un modelo de gestión basado en el reciclaje, el tratamiento de residuos orgánicos y la inclusión de recicladores de base, con énfasis en la economía circular. En el caso del relleno sanitario de Santa Cruz, será necesario actualizar su modelo de gestión.

## **5.2 Trabajo futuro**

De esta experiencia adquirida en el futuro, realizaré como primer paso, modelo de gestión basados en economía circular y inteligencia artificial a fin de optimizar recursos en las fases de la gestión integral de los residuos. Por otro lado, en esta tesis e identificado áreas que se puede investigar nuevos proyectos para la gestión integral de los residuos sólidos, con el enfoque en la fase de disposición final.

1. Estudio para el diseño de sistemas de captación del biogás de relleno, sanitario y la planta de tratamiento de lixiviados.
2. Evaluación de la factibilidad de la implementación de una planta de pirolisis para la valorización energética de los residuos plásticos.
3. Compensación de emisiones de gases de efecto invernadero en el Ecuador.

## 6 Bibliografía

1. Silva-Martínez, R.D.; Sanches-Pereira, A.; Ortiz, W.; Gómez Galindo, M.F.; Coelho, S.T. The State-of-the-Art of Organic Waste to Energy in Latin America and the Caribbean: Challenges and Opportunities. *Renew. Energy* **2020**, *156*, 509–525, doi:10.1016/j.renene.2020.04.056.
2. Rodríguez, A.; Baca, K. Generación de Residuos Sólidos Urbanos (RSU): Análisis de Una Década de Gestión En Países de Europa y América. *Rev. Ecuat. Med. Cienc. Biol.* **2021**, *42*, 49–61, doi:10.26807/remcb.v43i1.919.
3. Poma, P.; Usca, M.; Toulkeridis, T. Evaluation of the Environmental Impacts Generated by the Management of Urban Solid Waste in the Open Waste Dump in Loreto , Eastern Ecuador. *Springer Natureswitzerl.* **2023**, 466–481, doi:[https://doi.org/10.1007/978-3-031-24971-6\\_33](https://doi.org/10.1007/978-3-031-24971-6_33).
4. Kaza S, Yao L, Bhada-Tata P, V.W.F. *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*; 2018; ISBN 9781464813290.
5. Edelson, M.; Håbesland, D.; Traldi, R. Uncertainties in Global Estimates of Plastic Waste Highlight the Need for Monitoring Frameworks. *Mar. Pollut. Bull.* **2021**, *171*, 112720, doi:10.1016/j.marpolbul.2021.112720.
6. Schmidt, S.; Laner, D. Environmental Waste Utilization Score to Monitor the Performance of Waste Management Systems: A Novel Indicator Applied to Case Studies in Germany. *Resour. Conserv. Recycl.* **2023**, *18*, 200160, doi:<https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2023.200160>.
7. Elboughdiri, N.; Imran Khan, M.; Missaoui, T. Estimating the Energy Recovery Potential from Municipal Solid Waste in Ha'il Region (Kingdom of Saudi Arabia). *Yanbu J. Eng. Sci.* **2022**, *19*, 11–17, doi:<https://doi.org/10.53370/001c.31893>.
8. Calero, D.; Carrión, A.; Montobbio, A. *Gestión Locval Del Cambio Climatico: Planificación Participativa y Gobernanza Territorial*; Carrión/Andrea, Ed.; La Pradera: Ecuador, 2021; ISBN 9789978675663.
9. Correal, M.; Faleiro, C.; Piamonte, C.; Rihm, J.; Zambrano, M. Sostenibilidad Financiera de La Gestión de Residuos Sólidos En América Latina y El Caribe. *Banco Interam. Desarro.* **2023**, *71*, doi:<http://dx.doi.org/10.18235/0004797>.
10. Vallejo, L.; Guevara, A.; Barreno, J.; Mogollón, D.; Polo, G. *Diagnóstico Sectorial de La Gestión Integral de Residuos y Desechos Sólidos No Peligrosos En Municipios Del Ecuador*; Ecuador, 2023;
11. Monar Villegas, L.H.; Hidalgo Osorio, W.A.; Quinatoa Caiza, C.I. Evaluación Técnica y Económica de La Transformación de Biogás En Energía Eléctrica. *Ing. Tecnol. e Investig.* **2024**, *7*, 2–31, doi:<https://doi.org/10.46296/ig.v7i14edespct.0230>.
12. Coral, K.; Costales, J.O.; Machado, A.R. Energía a Partir de Residuos Sólidos Urbanos , Caso Parroquia Limoncocha En La Amazonía Ecuatoriana. *Rev. Int. Adm.* **2021**, *9*, 215–236, doi:<https://doi.org/10.32719/25506641.2021.9.9> Recibido:
13. Unesum-ciencias, R. Valorización Energética de Los Residuos Sólidos Urbanos ( RSU ) Generados En El Litoral Ecuatoriano. *Rev. UNESUM-Ciencias* **2025**, *9*, 42–50, doi:<https://doi.org/10.47230/unesum-ciencias.v9.n1.2025.42-50> Recibido:
14. Ministerio del Ambiente, A. y T.E. *Instructivo Para Implementar La Fase de Separación En La Fuente de Residuos y Desechos Sólidos No Peligrosos*; 2024;

15. Ministra del Ambiente, A. y T.E. *Componente Estratégico Del Plan Nacional de Gestión de Residuos y Desechos Sólidos No Peligrosos*; 2023;
16. Win, K.; Yabar, H. Analysis of Household Waste Generation and Composition in Mandalay: Urban – Rural Comparison and Implications for Optimizing Waste Management Facilities. *Waste* **2024**, *2*, 490–509, doi:<https://doi.org/10.3390/waste2040026>.
17. Solíz, M.; Cárdenas, D.; López, M.; Peláez, J.; Pérez, H.; Quincha, E.; Vinueza, M.; Quishpe, G.; Cadena, V.; Torres, D.; et al. *Territorios En Sacrificio Comunidades Basurizadas*; Solíz, M., López, C., Eds.; Primera ed.; Quito, Ecuador, 2023; ISBN 978-9942-604-88-0.
18. He, R.; Sandoval-Reyes, M.; Scott, I.; Semeano, R.; Ferrão, P.; Matthews, S.; Small, M.J. Global Knowledge Base for Municipal Solid Waste Management: Framework Development and Application in Waste Generation Prediction. *J. Clean. Prod.* **2022**, *377*, doi:10.1016/j.jclepro.2022.134501.
19. Minas, M. de E. y *Balance Energético Nacional 2023*; Ecuador, 2023;
20. Minas, M. de energía y *Plan Maestro de Electricidad 2023 – 2032*; Ecuador, 2023;
21. Hidalgo, J.; Moreira, C.M.; Jervis, F.X.; Soto, M.; Amaya, J.L.; Banguera, L. Circular Economy of Expanded Polystyrene Container Production: Environmental Benefits of Household Waste Recycling Considering Renewable Energies. *Energy Reports* **2022**, *8*, 306–311, doi:<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.01.071>.
22. Ibarra, B.; Narváez, M. Análisis de La Disposición de Los Desechos Sólidos y Generación de Biogás En El Relleno Sanitario de Ambato, Ecuador. *AIDIS* **2020**, *13*, 988–1006, doi:<http://dx.doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2020.13.3.68441>.
23. Burneo, D.; Cansino, J.M.; Yñiguez, R. Environmental and Socioeconomic Impacts of Urban Waste Recycling as Part of Circular Economy. The Case of Cuenca (Ecuador). *Sustain.* **2020**, *12*, 0–22, doi:10.3390/SU12083406.
24. Villalba Ferreira, M.; Dijkstra, G.; Scholten, P.; Sucozhañay, D. The Effectiveness of Inter-Municipal Cooperation for Integrated Sustainable Waste Management: A Case Study in Ecuador. *Waste Manag.* **2022**, *150*, 208–217, doi:10.1016/j.wasman.2022.07.008.
25. Bayas, H. Primera Réplica Del Modelo Tarifario Basado En Volumen Para La Gestión de Residuos En Santa Cruz-Galápagos. *FIGEMPA Investig. y Desarro.* **2024**, *18*, 101–117, doi:<https://doi.org/10.29166/revfig.v18i2.662>.
26. Cabrera, S.; Guevara, A. Landfill Gas Generation and Utilisation (Case Study: Chasinato Landfill. Ambato, Ecuador). *Renew. Energy Power Qual. J.* **2022**, *20*, 296–300, doi:<https://doi.org/10.24084/repqj20.290>.
27. Antonio, J.; Piñas, J.; Gomer, G.; Cabello, C. Gestión Integral de Residuos Sólidos Como Herramienta Para La Optimización Del Servicio de Limpieza Pública. *Cienc. Lat. Rev. Científica Multidiscip.* **2021**, *5*, 3275–3295, doi:10.37811/cl\_rcm.v5i3.531.
28. Fernández, G.; Lupaca, R.; Días, D. Gobiernos Municipales y Gestión Integral de Residuos Sólidos En América Latina: Una Revisión Sistemática. *Climatologica* **2024**, *24*, 981–986, doi:10.59427/rcli/2024/v24cs.981–986.
29. Rodríguez, A.; Mejías, R.; Vindas, C. Impacto de Las Medidas Implementadas En La Gestión Integral de Residuos Sólidos, En El Tecnológico de Costa Rica. *Rev. Tecnol. en*

*Marcha* **2021**, *34*, 3–15, doi:<https://doi.org/10.18845/tm.v34i1.4811>.

30. Ministra del Ambiente, A. y T.E. *Guía Para La Cuantificación y Caracterización de Residuos y Desechos Sólidos No Peligrosos En Cantones Del Ecuador*; 2023;
31. Byamba, B.; Ishikawa, M. Municipal Solid Waste Management in Ulaanbaatar, Mongolia: Systems Analysis. *Sustain.* **2017**, *9*, doi:10.3390/su9060896.
32. Poma, P.; Polanco, M.; Toulkeridis, T.; Ramón, C. Estimation of Biogas Generated in Two Landfills in South-Central Ecuador. *Atmosphere (Basel)*. **2021**, *12*, 16, doi:<https://doi.org/10.3390/atmos12101365>.
33. Li, G.; Xu, F.; Yang, T.; Wang, X.; Lyu, T. Microbial Behavior and Influencing Factors in the Anaerobic Digestion of Distiller : A Comprehensive Review. *Fermentation* **2023**, *9*, 1–29, doi:<https://doi.org/10.3390/fermentation9030199>.
34. Suryodiningrat, S.P.; Ramadhan, A. Integrated Solid Waste Management System Using Distributed System Architecture for Indonesia: An IT Blueprint. *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol.* **2023**, *13*, 1177–1183, doi:10.18517/ijaseit.13.3.17307.
35. Varbero Moreno, M.T. *Manual de Biogás*; Santiago de Chile, 2011; ISBN 978-95-306892-0.
36. Tchobanoglous, G. *Handbook of Solid Waste Management*; Segunda.; New York, 1976; ISBN 0071500340.
37. Chuenwong, K.; Wangjiraniran, W.; Pongthanaisanwan, J.; Sumitsawan, S.; Suppamit, T. Municipal Solid Waste Management for Reaching Net-Zero Emissions in ASEAN Tourism Twin Cities: A Case Study of Nan and Luang Prabang. *Heliyon* **2022**, *8*, e10295, doi:10.1016/j.heliyon.2022.e10295.
38. Siddiqi, M.M.; Naseer, M.N.; Wahab, Y.A.; Hamizi, N.A.; Badruddin, I.A.; Chowdhury, Z.Z.; Akbarzadeh, O.; Johan, M.R.; Khan, T.M.Y.; Kamangar, S. Evaluation of Municipal Solid Wastes Based Energy Potential in Urban Pakistan. *Processes* **2019**, *7*, 1–13, doi:10.3390/pr7110848.
39. Landfills, S. Los Rellenos Sanitarios, Una Solución Paliativa a La Problemática de Residuos Sólidos En Zamora, Michoacán, México. *Rev. Latinoam. Ciencias Soc. y Humanidades* **2022**, *3*, 1111–1126, doi:<https://doi.org/10.56712/latam.v3i2.170>.
40. Jaramillo, J. *Guía Para El Diseño , Construcción y Operación de Rellenos Sanitarios Manuales*; Lima, Perú, 2002;
41. Rada, E.C. *Solid Waste Management*; Rada, E., Ed.; Elena Cris.; 2016; Vol. 01; ISBN 2013206534.
42. Ortega Viera, L.; Rodríguez Muñoz, S.; Fernández Santana, E.; Bárcenas Pérez, L. Principales Métodos Para La Desulfuración Del Biogás. *Ing. Hidráulica y Ambient.* **2015**, *XXXVI*, 45–56.
43. Montiel-Bohórquez, N.D.; Pérez, J.F. Generación de Energía a Partir de Residuos Sólidos Urbanos. Estrategias Termodinámicas Para Optimizar El Desempeño de Centrales Térmicas. *Inf. Tecnol.* **2019**, *30*, 273–283, doi:10.4067/S0718-07642019000100273.
44. Deng, L.; Liu, Y.; Wang, W. *Biogas Technology*; Singapore, S.N., Ed.; 2020; ISBN 9789811549397.
45. Panesso, A.F.; Cadena, J.A.; Mora Flórez, J.J.; Ordoñez, M. del C. Análisis Del Biogás Captado En Un Relleno Sanitario Como Combustible Primario Para La Generación de

Energía Eléctrica. *Sci. Tech.* **2011**, XVII, 22–28.

46. Sofan German, S.J.; Arrieta Torres, J.D.; Ruíz Garcés, A.; Doria Oviedo, M.E. Evaluación Energética de La Formación de Biogás Obtenido de Residuos Sólidos Urbanos Del Relleno Sanitario Mediante El Modelo LandGEM. *Investig. e Innovación en Ing.* **2023**, 11, 16–27, doi:<https://doi.org/10.17081/invino.11.2.6373>.
47. Valdivia Espinoza, A.; Guardia Muguruza, X. Valorización Energética de Residuos Orgánicos: El Vínculo Entre La Política Energética y La Gestión Integral de Residuos Sólidos. *South Sustain.* **2023**, 4, 1–6, doi:[10.21142/SS-0401-2023-e074](https://doi.org/10.21142/SS-0401-2023-e074).
48. Morales, J. Valoración Energética de Los Desechos Sólidos Del Cantón Gonzalo Pizarro, Ecuador. *Rev. Cienc. y Tecnol.* **2021**, 20, 80–88.
49. Morero, B.; Groppelli, E.S.; Campanella, E.A. Evaluation of Biogas Upgrading Technologies Using a Response Surface Methodology for Process Simulation. *J. Clean. Prod.* **2017**, 141, 978–988, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.167>.
50. Barbusiński, K.; Parzgentna, A.; Kasperczyk, D. Removal of Odors (Mainly H<sub>2</sub>S and NH<sub>3</sub>) Using Biological Treatment Methods. *Clean Technol.* **2021**, 3, 138–155, doi:<https://doi.org/10.3390/cleantechnol3010009>.
51. Morales, J. Comportamiento Dinámico Del Biogás En El Relleno Sanitario Del Cantón Gonzalo Pizarro, Ecuador. *Cienc. Lat. Rev. Científica Multidiscip.* **2021**, 5, 11291–11301, doi:[https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v5i6.1168 p11291](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v5i6.1168).
52. Fudala, S.; Pierpaoli, M.; Kulbat, E.; Luczkiewicz, A. A Modern Solid Waste Management Strategy - the Generation of New by-Products. *Waste Manag.* **2016**, 49, 516–529, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.01.022>.
53. Guasumba Codena, S.J.; Tafur Escanta, P.M.; Tipanluisa, L.; Ocaña, E.; Pérez Rosales, J.E. Producción Eficiente de Biogás Mediante Calentamiento Del Sustrato Con Energía Solar Térmica de Baja Temperatura. *Científica* **2019**, 23, 3–12.
54. Morero, B.; Rodriguez, M.B.; Campanella, E.A. Bioresource Technology Environmental Impact Assessment as a Complement of Life Cycle Assessment . Case Study : Upgrading of Biogas. *Bioresour. Technol.* **2015**, 190, 402–407, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.04.091>.
55. Resyes, E.; Pérez, E. Caracterización de Las Propiedades Fisicoquímicas de Las Excretas de Ganado, Caballo, Cerdo y Gallinaza Para La Generación de Biogás. *Rev. Científica FAREM-Estelí* **2019**, 97–108, doi:<https://doi.org/10.5377/farem.v0i31.8474>.
56. Sánchez, F.; Crespo, G.; Fernández, S. *Situación Actual de La Producción de Biogás y de Su Aprovechamiento; Conocimiento*, F. madrid para el, Velázquez, 76. E-28001 Madrid, Eds.; 213AD; ISBN 9788461294879.
57. Turcott, D.; López, A.; Cuartas, M.; García, A. Using Indicators as a Tool to Evaluate Municipal Solid Waste Management: A Critical Review. *Waste Manag.* **2018**, 80, 51–63, doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.08.046>.
58. Rafiee, A.; Khalilpour, K.R.; Prest, J.; Skryabin, I. Biogas as an Energy Vector. *Biomass and Bioenergy* **2021**, 144, 105935, doi:[10.1016/j.biombioe.2020.105935](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105935).
59. Pooja, Y.; Ranjan, S. Environmental Impact Assessment of Municipal Solid Waste Management Options Using Life Cycle Assessment: A Case Study. *Env. Sci Pollut Res* **2018**, 25, 838–854, doi:<https://doi.org/10.1007/s11356-017-0439-7>.

60. Xiao, S.; Dong, H.; Geng, Y.; Tian, X.; Liu, C.; Li, H. Policy Impacts on Municipal Solid Waste Management in Shanghai: A System Dynamics Model Analysis. *J. Clean. Prod.* **2020**, *262*, 121366, doi:10.1016/j.jclepro.2020.121366.
61. Becerra, D.; Gomez, Y.; Ramírez, L.; Barajas, A.; Solano, B.; Machuca, F. Procesos Avanzados de Oxidación Basados En Ozono Como Alternativa de Tratamiento Para Lixiviados de Rellenos Sanitarios. *Cienc. en Desarrollo*. **2021**, *12*, 95–108, doi:<https://doi.org/10.19053/01217488>.
62. Santos, S.M.; Gonçalves, M.; Brito, P.; Nobre, C. Waste-Derived Chars: A Comprehensive Review. *Waste* **2024**, *2*, 218–239, doi:Waste-Derived Chars: A Comprehensive Review.
63. Moratorio, D.; Rocco, I.; Castelli, M. Conversión de Residuos Sólidos Urbanos En Energía Converting Municipal Solid Waste into Energy. *Mem. Trab. Difusión Científica y Técnica* **2012**, *10*, 115–126.
64. Reyes, E. Generación de Biogás Mediante El Proceso de Digestión Anaerobia, a Partir Del Aprovechamiento de Sustratos Orgánicos. *Rev. Científica FAREM-Estelí. Medio Ambient. Tecnol. y Desarrollo Hum.* **2017**, *24*, 60–81.
65. Nanda, S.; Berruti, F. Municipal Solid Waste Management and Landfilling Technologies: A Review. *Environ. Chem. Lett.* **2020**, *19*, 1433–1456, doi:10.1007/s10311-020-01100-y.
66. Negash, Y.T.; Sarmiento, L.S.C.; Tseng, M.L.; Lim, M.K.; Ali, M.H. Engagement Factors for Household Waste Sorting in Ecuador: Improving Perceived Convenience and Environmental Attitudes Enhances Waste Sorting Capacity. *Resour. Conserv. Recycl.* **2021**, *175*, 105893, doi:10.1016/j.resconrec.2021.105893.
67. Varnero, M.T.; Carú, M.; Galleguillos, K.; Achondo, P. Tecnologías Disponibles Para La Purificación de Biogás Usado En La Generación Eléctrica. *Inf. Tecnol.* **2012**, *23*, 31–40.
68. Morero, B.; Gropelli, E.; Campanella, E.A. Revisión de Las Principales Tecnologías de Purificación de Biogás. *Cienc. y Tecnol.* **2010**, *10*, 187–202.
69. Poma, P.; Usca, M.; Polanco, M.; Toulkeridis, T.; Mestanza-ramón, C. Estimation of Biogas Generated in Two Landfills in South-Central Ecuador. *Atmosphera* **2021**, *1*–16.
70. Ibarra, B.; Narváez, M.; Rosa, A. Análisis de La Disposición de Los Desechos Sólidos y Generación de Biogás En El Relleno Sanitario de Ambato, Ecuador. *Rev. AIDIS Ing. y Ciencias Ambient. Investig. Desarrollo. y práctica.* **2020**, *13*, 988–1006, doi:<http://dx.doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2020.13.3.68441>.
71. Article, R. Revisión de Mecanismos de Valorización Energética Para Residuos Sólidos Urbanos Caso: Relleno Sanitario Doña Juana. *Prod. más Limpia* **2023**, *18*, 192–206, doi:10.22507/pml.v18n1a12.
72. Galván, S.L.; Sosa, L.V.; Faitani, N.G.; Bielsa, R.O. Transición Energética En América Latina y El Caribe . Desafíos y Oportunidades Para Las Tecnologías de Valorización Energética de Residuos Sólidos. *Estud. Ambient.* **2023**, *11*, 4–23.
73. Angulo-Mosquera, L.S.; Alvarado-Alvarado, A.A.; Rivas-Arrieta, M.J.; Cattaneo, C.R.; Rene, E.R.; García-Depraect, O. Production of Solid Biofuels from Organic Waste in Developing Countries: A Review from Sustainability and Economic Feasibility Perspectives. *Sci. Total Environ.* **2021**, *795*, doi:10.1016/j.scitotenv.2021.148816.
74. Scarlat, N.; Motola, V.; Dallemand, J.F.; Monforti-ferrario, F.; Mofor, L. Evaluation of Energy Potential of Municipal Solid Waste from African Urban Areas. *Renew. Sustain.*

*Energy Rev.* **2015**, *50*, 1269–1286, doi:10.1016/j.rser.2015.05.067.

75. Cruz Vieira, L.; Candiani, G. Potencial Energético de Resíduos Sólidos Urbanos Na Região Do Grande ABC Paulista. *Rev. Ibero-Americana Ciências Ambient.* **2021**, *12*, 328–342, doi:<http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.002.0030>.
76. Yaashikaa, P.R.; Kumar, P.S.; Saravanan, A.; Varjani, S.; Ramamurthy, R. Bioconversion of Municipal Solid Waste into Bio-Based Products: A Reviewon Valorisation and Sustainable Approach for Circular Bioeconomy. *Sci. Total Environ.* **2020**, *748*, 141312, doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141312>.
77. Martínez-rodríguez, M.C.; Elizabeth, L.; Piña-garrido, B. Cálculo de La Generación de Biogás Por El Método de Digestión Anaerobia a Partir de Biomasa Extraída de La Central de Abasto de Ecatepec , Estado de México. *Tecnol. en Marcha* **2023**, *36*, 8, doi:<https://doi.org/10.18845/tm.v36i4.6106>.
78. Barragán-Escandón, A.; Ruiz, J.M.O.; Tigre, J.D.C.; Zalamea-León, E.F. Assessment of Power Generation Using Biogas from Landfills in an Equatorial Tropical Context. *Sustain.* **2020**, *12*, 1–18, doi:10.3390/su12072669.
79. Martínez, E.; Rodríguez, J. Aplicación de Las Metodologías EPA , Mexicano e IPCC Para La Estimación de Biogás , Caso de Estudio Relleno Sanitario Doña Juana , Bogotá - Colombia. *Univ. y Salud Sección Articul. Orig.* **2016**, *7*, doi:<http://dx.doi.org/10.22267/rus.161802.43>.
80. Gollapalli, M.; Kota, S.H. Methane Emissions from a Landfill in North-East India: Performance of Various Landfill Gas Emission Models. *Environ. Pollut.* **2018**, *234*, 7, doi:10.1016/j.envpol.2017.11.064.
81. Jiménez Martínez, N.M. La Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos En México: Entre La Intención y La Realidad. *Let. Verdes. Rev. Latinoam. Estud. Socioambientales* **2015**, *17*, 29–56, doi:10.17141/letrasverdes.17.2015.1419.
82. Moya, D.; Aldás, C.; Jaramillo, D.; Játiva, E.; Kaparaju, P. Waste-To-Energy Technologies: An Opportunity of Energy Recovery from Municipal Solid Waste, Using Quito - Ecuador as Case Study. *Energy Procedia* **2017**, *134*, 327–336, doi:10.1016/j.egypro.2017.09.537.
83. Andrade, A.; Restrepo, A.; Tibaquira, J.E. Estimación de Biogás de Relleno Sanitario, Caso de Estudio: Colombia. *Entre Cienc. e Ing.* **2018**, *12*, 40–47, doi:<http://dx.doi.org/10.31908/19098367.3701>.
84. Gutiérrez Zamora, J.A.; Méndez Estrada, R.A.M.; Gutierrez Ledezma, V.O. *Guía Para El Diseño, Construcción, Operación, Mantenimiento y Cierre de Rellenos Sanitarios*; 2012;
85. Holewa-rataj, J.; Rataj, M.; Kapusta, P.; Brzeszcz, J.; Janiga, M.; Król, A. Home Biogas Production from Organic Waste : Challenges and Process Optimization of Methane Fermentation. *Energies* **2025**, *18*, 30, doi:<https://doi.org/10.3390/en18071745>.
86. Hernández, M.; Aguilar, Q.; Taboada, P.; Lima, R.; Eljaiek, M.; Márquez, L.; Buenrostro, O. Generación y Composición de Los Residuos Sólidos Urbanos En América Latina y El Caribe. *Rev. Int. Contam. Ambient.* **2016**, *32*, 11–22, doi:10.20937/RICA.2016.32.05.02.
87. Lazo Rivera, E.M. Management of Solid Urban Waste and the Participation of Its Actors. *J. Surv. Fish. Sci.* **2023**, *10*, 2440–2457.
88. Röben, E. Diseño, Construcción, Operación y Cierre de Rellenos Sanitarios Municipales. *2002*, *1*–151.

89. Zamora, J. *Guía Para El Diseño, Construcción, Operación, Mantenimiento y Cierre de Rellenos Sanitarios Dirección General de Gestión Integral de Residuos Sólidos*; 2012;
90. Turcott, D.; Romero, E.; Hernández, M.; López, A.; Mañon, M.; Lobo, A. Assessment of Some Governance Aspects in Waste Management Systems: A Case Study in Mexican Municipalities. *J. Clean. Prod.* **2021**, *278*, 12, doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123320>.
91. Acuerdo Ministerial 097-A TEXTO UNIFICADO DE LEGISLACIÓN SECUNDARIA DEL MINISTERIO DEL AMBIENTE. *Regist. Of. Edición Espec. N° 387* **2015**, 1–184.
92. Coacalla-Castillo, C.E.; Pareja, J.; Suarez, A.N. Indicadores de Gestión En El Manejo Integral de Residuos Sólidos de La Municipalidad de Aymaraes. *Avances* **2020**, *22*, 312–324.
93. Poma, P.; Polanco, M.; Usca, K.; Casella, C.; Toulkeridis, T.L. An Evaluation of the Public Service of the Integrated Municipal Management of Urban Solid Waste in the Galapagos and the Amazonian Region of Ecuador. *Sustainability* **2025**, *17*, 1–27, doi:<https://doi.org/10.3390/su17031066>.
94. Krause, M.; Thorneloe, S. *Landfill Gas Emissions Model ( LandGEM ) Version 3 . 1 User Manual*; Washington, DC 20460, 2024;
95. Becerra Quiroz, A.P.; Rodríguez Morón, S.A.; Acevedo Pabón, P.-A.; Ilarri, J.R.; Rodrigo Clavero, M.-E. Evaluation of the Dark Fermentation Process as an Alternative for the Energy Valorization of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste ( OFMSW ) for Applied Sciences Evaluation of the Dark Fermentation Process as an Alternative for the Energy Valoriza. *Appl. Sci.* **2024**, doi:<https://doi.org/10.3390/app14083437>.
96. Mokhtari, M.; Asghar Ebrahimi, A.; Rezaeinia, S. Prediction of Greenhouse Gas Emissions in Municipal Solid Waste Landfills Using LandGEM and IPCC Methods in Yazd, Iran. *J. Environ. Heal. Sustain. Dev.* **2020**, *5*, 1145–1154, doi:<https://doi.org/10.18502/jehsd.v5i4.4964>.
97. Fallahizadeh, S.; Rahmatinia, M.; Mohammadi, Z.; Vaezzadeh, M.; Tajamiri, A.; Soleimani, H. Estimation of Methane Gas by LandGEM Model from Yasuj Municipal Solid Waste Landfill, Iran. *MethodsX* **2019**, *6*, 391–398, doi:[10.1016/j.mex.2019.02.013](https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.02.013).

## 7 Anexo

### 7.1 Listado de publicaciones

The following publications are presented as part of the current thesis. All papers were published in international journals indexed in ISI Web of Knowledge.

Manuscrito I. Poma, P., Usca, M., Toulkeridis, T. (2023). Evaluation of the Environmental Impacts Generated by the Management of Urban Solid Waste in the Open Waste Dump in Loreto, Eastern Ecuador. In: Botto-Tobar, M., Zambrano Vizuete, M., Montes León, S., Torres-Carrión, P., Durakovic, B. (eds) Applied Technologies. ICAT 2022. Communications in Computer and Information Science, vol 1756. Springer, Cham.

DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-24971-6\\_33](https://doi.org/10.1007/978-3-031-24971-6_33)

Manuscrito II. Poma, P.; Polanco, M.; Usca, K.; Casella, C.; Toulkeridis, T. An Evaluation of the Public Service of the Integrated Municipal Management of Municipal Solid Waste in the Galapagos and the Amazonian Region of Ecuador. *Sustainability* 2025, 17, 1066.

DOI: <https://doi.org/10.3390/su17031066>

Manuscrito III. Poma, P., Usca, M.; Polanco, M.; Toulkeridis, T.; Mestanza-Ramón, C. Estimation of Biogas Generated in Two Landfills in South-Central Ecuador. *Atmosphere* 2021, 12, 1365.

DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos12101365>.

Manuscrito IV. Poma, P., et al. "Landslide and Environmental Risk from Oil Spill Due to the Rupture of SOTE and OCP Pipelines, San Rafael Falls, Amazon Basin, Ecuador". *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, vol. 11, no. 4, Aug. 2021, pp. 1558-66, doi:10.18517/ijaseit.11.4.13727.

DOI: <https://doi.org/10.18517/ijaseit.11.4.13727>

## **7.2 Contribución en los artículos**

1. Manuscrito I. En este trabajo, fui responsable del diseño, metodología, validación, investigación, administración del proyecto y análisis formal de los resultados y de la redacción del manuscrito original bajo la supervisión del Dr. Theofilos Toulkeridis en la sección de conceptualización y discusión.
2. Manuscrito II. En este trabajo, fui responsable del diseño, metodología, validación, investigación, así como en el análisis formal de los resultados y de la redacción del manuscrito original con la colaboración del Dr. Theofilos Toulkeridis en la sección de conceptualización, supervisión y discusión.
3. Manuscrito III. Durante esta investigación, estuve a cargo del diseño, metodología, validación, investigación, administración del proyecto y análisis formal de los resultados y de la redacción del manuscrito original con la supervisión del Dr. Theofilos Toulkeridis en la preparación del manuscrito.
4. Manuscrito IV. En este trabajo, fui responsable del diseño, metodología, validación, investigación, administración del proyecto y análisis formal de los resultados y de la redacción del manuscrito original con la supervisión del Dr. Theofilos Toulkeridis en la preparación del manuscrito.

### 7.3 Formatos para el Plan de gestión integral de residuos sólidos

#### Fase de Separación en la fuente

Resultados de la Gestión Integral de Residuos	Observaciones
Si:	
Ordenanza Municipal	No:
	Otro:
	Cumple:
Cumple con la ordenanza municipal	No Cumple:
	Parcial:
Proyectos ejecutados	Ningún tipo de proyecto al respecto.

Fuente: PGI-GRECI-MAATE

#### Fase de Almacenamiento temporal

Resultados de la Gestión Integral de Residuos	Observaciones
Si:	
Ordenanza Municipal	No:
	Otro:
	Cumple:
Cumple con la ordenanza municipal	No Cumple:
	Parcial:
Proyectos ejecutados	Ningún tipo de proyecto al respecto.

Fuente: PGI-GRECI-MAATE

#### Fase de Barrido y limpieza

Resultados de la Gestión Integral de Residuos	Observaciones
Permiso ambiental	Certificado Ambiental: Registro Ambiental: Licencia Ambiental: No cuenta con permiso ambiental:

	Número del permiso:			
<b>Zona</b>	Urbano		Rural	
<b>Prestación del Servicio</b>	Si		Si	
	No		No	
<b>Longitud total de calles en el cantón (km)</b>				
<b>Longitud calles Barridas (lineales barridos/mes)</b>				
<b>Rutas (rutas/mes)</b>				
<b>Frecuencia</b>	Semana I	Cuántas veces:	Semanal	Cuántas veces:
	Mensual	Cuántas veces:	Mensual	Cuántas
<b>Número de obreros de barrido</b>				
<b>Días efectivos de trabajo</b>	días trabajados/mes			

Fuente: PGI-GRECI-MAATE

#### Fase de Recolección

	Resultados de la Gestión Integral de Residuos			Observaciones
Permiso ambiental	Certificado Ambiental:  Registro Ambiental:  Licencia Ambiental:  No cuenta con permiso ambiental:			
	Número del permiso:			
Zona	Urbano		Rural	
Prestación del Servicio	Si		Si	
	No		No	
Cantidad de días de recolección	Semanal	Cuántas veces:	Semanal	Cuántas veces:
	Mensual	Cuántas veces:	Mensual	Cuántas veces:

---

Número de rutas y/o sectores

Turnos y/o jornadas

Cantidad de vehículos de recolección

Cantidad de viajes realizados al día

Cantidad de viajes realizados al mes

Kilómetros recorridos por ruta

Kilómetros recorridos por vehículo al mes

Cantidad de residuos recolectados

Cantidad de residuos recolectados

Cobertura

Número de ayudantes de recolección

Días efectivos de trabajo

---

Fuente: PGI-GRECI-MAATE

#### Fase de Transporte

Resultados de la Gestión Integral de Residuos		Observaciones
	Certificado Ambiental:	
	Registro Ambiental:	
Permiso ambiental	Licencia Ambiental:	
	No cuenta con permiso ambiental:	
	Número del permiso:	
Prestación del servicio	Si	
	No	
Número de vehículos		
Número de viajes		
Cantidad Transportada		
Cantidad Transportada		

Fuente: PGI-GRECI-MAATE

## Fase de aprovechamiento

Resultados de la Gestión Integral de Residuos		Observaciones
	Certificado Ambiental:	
Permiso ambiental	Registro Ambiental:	
	Licencia Ambiental:	
	No cuenta con permiso ambiental:	
	Número del permiso:	
Durante esta fase se trabaja con recicladores de base y organizaciones de la economía popular y solidaria	Si	
Cantidad de residuos reciclables recuperados		No
Porcentaje de recuperación de residuos reciclables		
Cantidad recuperada de residuos orgánicos		
Porcentaje de recuperación de residuos orgánicos		
Señale en la escala de color, de acuerdo a la fase en la que se encuentre	Rojo: Amarillo: Verde:	

Indicador	Unidad de Medida	Rojo	Amarillo	Verde
Recolección diferenciada de residuos sólidos con proceso de separación en la fuente.	Criterio	No cuenta con ningún proyecto de recolección diferenciada	Cuenta con un proyecto de recolección diferenciada	Cuenta con un sistema de recolección diferenciada
Cobertura de recolección diferenciada de residuos sólidos con proceso de separación en la fuente en el área urbana.	Porcentaje	<50%	50-80%	>80%

Fuente: PGI-GRECI-MAATE

## Fase de Disposición final

Resultados de la Gestión Integral de Residuos Sólidos		Observaciones
	Certificado Ambiental:	
	Registro Ambiental:	
<b>Permiso ambiental</b>	Licencia Ambiental:	
	No cuenta con permiso ambiental:	
	Número de permiso:	
	Relleno Sanitario:	
	Relleno Sanitario Mancomunado:	
	Celda Emergente:	
<b>Tipo</b>	Celda Emergente mancomunada:	
	Botadero:	
	Botadero Mancomunado:	
	Parroquia: Ávila Huiruno	
	Sector: Sector Triunfo Bajo	
	Calle Principal: Vía Interoceánica	
<b>Ubicación del lugar de disposición final</b>	Coordenadas UTM WGS 84 18 Sur (Celda emergente)	
	X	Y
<b>Fecha de inicio de operación del lugar de disposición final</b>		
<b>Tiempo de vida útil</b>		
<b>Área del lugar</b>		

Trincheras:

Plataformas:

**Método de operación** Mixto:

Otro:

Indique cual: Método de Área

**Cuenta con balanza de pesaje**

Si:

No:

**Cantidad de residuos dispuestos en el sitio de disposición final**

**Volumen ocupado por los residuos en el sitio de disposición final**

Cunetas perimetrales de coronación:

**Unidades sanitarias existente en el sitio de disposición final**

Sistema para evacuación de biogás:

Sistema de tratamiento de lixiviados:

Tipo de tratamiento: Filtro biológico

Cerramiento:

Casetas de guardianía:

**Infraestructura existente en el sitio de disposición final**

Oficina Administrativa:

Bodega:

Otros:

---

Fuente: PGI-GRECI-MAATE