

**Análisis y propuesta para la disposición final de residuos peligrosos (RESPEL) en el  
municipio de Mitú, Vaupés**

Oscar Fabián Espinosa Torres

Asesor

Marcela Mejía Guarín

Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD

Escuela de Ciencias Jurídicas y Políticas – ECJP

Maestría en Política, Derecho y Gestión Ambiental

2026

## Tabla de contenido

Dedicatoria .....	9
Agradecimientos .....	10
Resumen.....	11
Abstract.....	12
Introducción .....	13
Planteamiento del Problema .....	15
Justificación .....	18
Objetivos.....	21
Objetivo general.....	21
Objetivos específicos .....	21
Marco conceptual y teórico.....	22
Residuos peligrosos (RESPEL) .....	22
Gestión integral de residuos peligrosos .....	22
Disposición final de residuos peligrosos.....	23
Desarrollo sostenible y gestión ambiental .....	23
Gestión pública ambiental y enfoque territorial.....	24
Marco normativo.....	25
Metodología .....	28
Enfoque metodológico .....	28

	3
Tipo y alcance de la investigación .....	28
Diseño metodológico .....	29
Estrategia metodológica.....	29
<i>Fase diagnóstica</i> .....	29
<i>Fase analítica</i> .....	30
<i>Evaluación multicriterio</i> .....	30
Componentes del análisis.....	32
<i>Fase propositiva</i> .....	33
Población del estudio .....	33
<i>Selección de participantes y entrevistas</i> .....	34
Integración metodológica.....	35
Limitaciones metodológicas .....	35
Consideraciones éticas .....	35
Resultados, análisis y evaluación del sistema de gestión de RESPEL en Mitú.....	36
Contexto territorial, ambiental e institucional del sistema de gestión de RESPEL en Mitú.....	36
Resultados de las entrevistas a actores institucionales .....	37
Caracterización de fuentes generadoras y tipos de residuos peligrosos en Mitú.....	39
<i>Generación de residuos peligrosos en Mitú</i> .....	40
<i>Transporte y disposición actual de los residuos</i> .....	41
<i>Problemáticas identificadas</i> .....	42

	4
<i>Brechas del sistema actual</i> .....	42
<i>Evaluación multicriterio de alternativas de disposición final</i> .....	43
<i>Interpretación analítica</i> .....	44
<i>Análisis financiero preliminar</i> .....	44
Análisis normativo e institucional de la gestión de residuos peligrosos (RESPEL) .....	45
Estimación técnica de la generación de residuos peligrosos (RESPEL) .....	48
<i>Estimación de residuos hospitalarios</i> .....	48
<i>Residuos peligrosos de origen mecánico</i> .....	49
<i>Residuos químicos y envases contaminados</i> .....	50
<i>Generación total estimada de RESPEL</i> .....	50
<i>Interpretación técnica de la estimación</i> .....	50
Evaluación comparativa de alternativas de disposición final de residuos peligrosos (RESPEL)	
.....	51
<i>Alternativa 1: Transporte aéreo de residuos peligrosos</i> .....	51
<i>Alternativa 2: Planta local de tratamiento y disposición final</i> .....	52
<i>Comparación económica de alternativas</i> .....	53
<i>Comparación ambiental y operativa</i> .....	54
<i>Comparación institucional y territorial</i> .....	54
<i>Síntesis del análisis comparativo</i> .....	54
Análisis integral de factibilidad del modelo propuesto.....	55

	5
<i>Factibilidad técnica</i> .....	55
<i>Factibilidad logística</i> .....	56
<i>Factibilidad económica</i> .....	56
<i>Factibilidad ambiental</i> .....	57
<i>Factibilidad institucional</i> .....	57
<i>Riesgos y consideraciones operativas</i> .....	58
<i>Síntesis del análisis de factibilidad</i> .....	58
Propuesta técnica: Planta local de disposición y tratamiento de residuos peligrosos (RESPEL) .....	59
<i>Enfoque conceptual de la propuesta</i> .....	60
<i>Justificación técnica del modelo modular</i> .....	61
<i>Componentes técnicos de la planta</i> .....	61
<i>Modelo de gestión pública propuesto</i> .....	62
<i>Integración con la política ambiental municipal</i> .....	63
<i>Beneficios estratégicos del modelo propuesto</i> .....	63
<i>Viabilidad territorial de la propuesta</i> .....	64
Lineamientos institucionales y estrategias de fortalecimiento de la gestión pública ambiental	64
<i>Fortalecimiento de la gestión institucional</i> .....	65
<i>Articulación interinstitucional</i> .....	65
<i>Educación ambiental y corresponsabilidad</i> .....	66

<i>Mecanismos de seguimiento y control</i> .....	66
<i>Impacto institucional y territorial esperado</i> .....	67
Conclusiones .....	68
Recomendaciones .....	70

## Lista de Tablas

Tabla 1. <i>Dimensiones analíticas del modelo de evaluación</i> .....	31
Tabla 2. <i>Criterios de evaluación</i> .....	31
Tabla 3. <i>Escala de valoración</i> .....	31
Tabla 4. <i>Ponderación de dimensiones</i> .....	32
Tabla 5. <i>Actores institucionales entrevistados</i> .....	34
Tabla 6. <i>Evaluación multicriterio de alternativas de disposición final</i> .....	44

## Lista de figuras

Figura 1. <i>Principales problemáticas identificadas en la gestión de RESPEL en Mitú</i> .....	38
Figura 2. <i>Percepción institucional sobre la implementación de una solución local de tratamiento de RESPEL</i> .....	39

### **Dedicatoria**

Dedico este trabajo a las comunidades que inspiran el compromiso de trabajar por territorios más sostenibles, justos y con mayores oportunidades para las regiones. Que el conocimiento y la investigación se conviertan siempre en herramientas para impulsar soluciones que contribuyan al bienestar colectivo y al cuidado del ambiente.

### **Agradecimientos**

Expreso mi sincero agradecimiento a las instituciones y actores del municipio de Mitú que compartieron su conocimiento y experiencia durante el desarrollo de esta investigación. Sus aportes fueron fundamentales para comprender los desafíos asociados a la gestión de residuos peligrosos en el territorio.

Asimismo, agradezco a quienes desde distintos espacios de liderazgo y servicio trabajan por el desarrollo de las regiones y por la construcción de oportunidades para sus comunidades. Este trabajo representa también un compromiso con la búsqueda de soluciones que contribuyan al fortalecimiento de la gestión ambiental territorial y al bienestar de las poblaciones que habitan estos territorios.

## Resumen

En el municipio de Mitú, capital del departamento del Vaupés, el manejo de residuos peligrosos (RESPEL) generados por hospitales, talleres y laboratorios constituye una problemática ambiental y sanitaria de alto impacto. La ausencia de infraestructura local para su tratamiento y disposición final ha favorecido prácticas inadecuadas que representan riesgos para la salud pública, generan presiones sobre los ecosistemas y dificultan el cumplimiento de la normativa ambiental vigente. En este contexto, la presente investigación tiene como propósito formular una alternativa técnica, ambiental y socialmente viable para la disposición final de estos residuos, sustentada en el enfoque de gestión integral y en los lineamientos establecidos por el Decreto 4741 de 2005 y la Resolución 1164 de 2002, considerando las condiciones territoriales del municipio. El estudio se desarrolla bajo un enfoque mixto, mediante revisión documental, entrevistas a actores locales, observación directa en campo y análisis costo–beneficio, comparando el modelo actual de transporte de residuos hacia otras ciudades con la implementación de una solución local. Como resultado, se obtuvo un diagnóstico integral, un análisis normativo y un estudio de factibilidad que sustentan la formulación de una propuesta técnica aplicable a la administración municipal.

**Palabras clave:** residuos peligrosos, RESPEL, gestión ambiental, disposición final, sostenibilidad, Mitú, Vaupés.

### **Abstract**

In the municipality of Mitú, capital of the department of Vaupés, the management of hazardous waste (RESPEL) generated by hospitals, workshops, and laboratories represents a significant environmental and public health challenge. The absence of local infrastructure for the treatment and final disposal of these wastes has led to inadequate practices that pose risks to public health, place pressure on ecosystems, and hinder compliance with current environmental regulations. In this context, the present research aims to formulate a technically, environmentally, and socially viable alternative for the final disposal of hazardous waste, based on the principles of integrated waste management and the regulatory framework established by Decree 4741 of 2005 and Resolution 1164 of 2002, considering the territorial conditions of the municipality. The study adopts a mixed-methods approach, including documentary review, interviews with local stakeholders, direct field observation, and cost–benefit analysis, comparing the current model of transporting hazardous waste to other cities with the implementation of a local treatment solution. As a result, the study developed a comprehensive diagnosis, a regulatory analysis, and a feasibility assessment that support the formulation of a technical proposal applicable to the municipal administration and aimed at strengthening environmental sustainability in Mitú.

**Keywords:** hazardous waste, RESPEL, environmental management, final disposal, sustainability, Mitú, Vaupés.

## Introducción

En el municipio de Mitú, capital del departamento del Vaupés, la gestión de los residuos peligrosos (RESPEL) generados por instituciones de salud, actividades de mantenimiento mecánico, laboratorios y establecimientos comerciales representa un desafío ambiental y sanitario significativo. A pesar de tratarse de una problemática poco visible en el debate público local, sus implicaciones sobre la salud humana, la calidad ambiental y la sostenibilidad del territorio son relevantes. La ausencia de infraestructura especializada para el tratamiento y la disposición final de estos residuos ha favorecido prácticas de manejo limitadas, incrementando los riesgos de contaminación de suelos y fuentes hídricas, así como las dificultades para garantizar el cumplimiento de la normativa ambiental vigente (Abarca Guerrero et al., 2013; Banco Mundial, 2018; Colombia, Decreto 4741, 2005).

En contextos geográficamente aislados como Mitú, las restricciones logísticas y de conectividad condicionan de manera directa los modelos de gestión de residuos, particularmente aquellos que requieren tecnologías especializadas. En la actualidad, el manejo de los RESPEL depende en gran medida de esquemas de almacenamiento temporal y transporte hacia otras ciudades, lo que implica costos operativos elevados, dependencia de gestores externos y retos en términos de trazabilidad y control ambiental. Esta situación evidencia la existencia de brechas estructurales en la gestión ambiental territorial, especialmente en lo relacionado con residuos de características peligrosas (IDEAM, 2022).

En este marco, la presente investigación se orienta a analizar de manera integral la problemática asociada a la disposición final de residuos peligrosos en Mitú, articulando dimensiones técnicas, normativas, económicas e institucionales. El estudio se desarrolla bajo un enfoque de investigación aplicada, con el propósito de formular una propuesta técnica, ambiental

y socialmente viable, adaptada a las condiciones del municipio y alineada con los lineamientos establecidos por la normativa nacional en materia de residuos peligrosos (Colombia, Resolución 1164, 2002).

El desarrollo del trabajo combina revisión documental, análisis normativo, entrevistas a actores institucionales, observación directa en campo y evaluación comparativa de alternativas, permitiendo construir un diagnóstico del sistema actual y sustentar la formulación de un modelo de solución local. De esta manera, la investigación busca contribuir al fortalecimiento de la gestión pública ambiental, la reducción de riesgos sanitarios y la consolidación de estrategias sostenibles de manejo de residuos peligrosos en territorios amazónicos.

## Planteamiento del Problema

El manejo de residuos peligrosos (RESPEL) constituye uno de los principales desafíos de la gestión ambiental contemporánea, particularmente en territorios con limitaciones estructurales, logísticas e institucionales. En el municipio de Mitú, capital del departamento del Vaupés, esta problemática adquiere una relevancia especial debido a la ausencia de infraestructura local especializada para el tratamiento y la disposición final de este tipo de residuos, generados principalmente por el sector salud, así como por actividades de mantenimiento mecánico, laboratorios y establecimientos comerciales. (Abarca Guerrero et al., 2013; Banco Mundial, 2018).

En la actualidad, los residuos peligrosos generados en el municipio dependen de esquemas de almacenamiento temporal y transporte hacia otras ciudades del país, mediante rutas logísticas complejas que se desarrollan principalmente por vía aérea. Este modelo implica costos operativos elevados, dependencia de gestores externos, restricciones en la frecuencia de evacuación de residuos y riesgos asociados al almacenamiento prolongado, lo cual incrementa la probabilidad de impactos ambientales y sanitarios. Estas condiciones evidencian una brecha significativa entre las exigencias normativas nacionales y las capacidades reales de gestión territorial (Colombia, Decreto 4741, 2005; Ziraba et al., 2016).

La problemática se intensifica al considerar que los residuos hospitalarios representan la corriente más crítica dentro del flujo de RESPEL en Mitú. La E.S.E. Hospital San Antonio de Mitú, como principal generador institucional, enfrenta limitaciones operativas derivadas de la necesidad de mantener residuos peligrosos en almacenamiento temporal hasta su transporte fuera del territorio. Esta situación no solo genera presiones logísticas y financieras, sino que también

plantea desafíos en términos de bioseguridad, control ambiental y sostenibilidad del sistema de gestión (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2018).

Adicionalmente, el municipio presenta antecedentes asociados a deficiencias en la gestión de residuos, evidenciados en actuaciones de la autoridad ambiental regional. La Corporación para el Desarrollo Sostenible del Norte y Oriente Amazónico (CDA) impuso medidas correctivas mediante la Resolución No. DSV-039-21 de 2021, relacionadas con prácticas de disposición que afectaron fuentes hídricas locales (CDA, 2021). Aunque dichas actuaciones se enmarcan en la gestión de residuos sólidos, reflejan debilidades estructurales en la planificación ambiental territorial y la necesidad de fortalecer soluciones técnicas diferenciadas para residuos de características peligrosas.

Si bien el municipio adelanta estudios orientados a la implementación de una planta de tratamiento de residuos sólidos, estos proyectos no contemplan de manera específica el manejo de los residuos peligrosos, lo cual perpetúa la dependencia externa y mantiene vigentes los riesgos ambientales, sanitarios y económicos asociados al modelo actual (IDEAM, 2022). En este contexto, resulta pertinente analizar alternativas técnicas, ambientales y económicamente viables que permitan fortalecer la autonomía territorial en la gestión de RESPEL.

Considerando la generación continua de residuos peligrosos, la dependencia total del transporte aéreo y los antecedentes de afectación ambiental en el municipio, la problemática adquiere un carácter urgente desde el punto de vista sanitario y ambiental. La ausencia de una solución local incrementa los riesgos de contaminación, compromete la sostenibilidad financiera del sistema y limita la capacidad institucional del municipio para cumplir con la normativa vigente, lo que justifica la necesidad inmediata de formular alternativas técnicas viables (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [PNUMA], 2019).

En este contexto, la problemática adquiere una dimensión estructural relevante. La generación estimada de residuos peligrosos en el municipio, situada en un rango aproximado entre 20 y 35 toneladas/año, refleja un flujo moderado pero constante que exige mecanismos de gestión técnica especializada. La ausencia de infraestructura local para su tratamiento y disposición final ha consolidado un modelo basado en transporte aéreo externo, cuyos costos operativos pueden oscilar entre \$240.000.000 y \$420.000.000 COP anuales, introduciendo presiones económicas significativas para el sistema de salud y la gestión pública municipal.

Desde una perspectiva ambiental y sanitaria, esta situación configura un escenario de vulnerabilidad territorial. El almacenamiento prolongado de residuos peligrosos, la dependencia de variables logísticas externas y la limitada capacidad de control operativo incrementan los riesgos potenciales para la salud pública y para ecosistemas amazónicos de alta fragilidad ecológica (OMS, 2018). En consecuencia, la problemática de los RESPEL en Mitú trasciende el ámbito operativo y se consolida como un desafío prioritario de gestión ambiental territorial.

## Justificación

La presente investigación se justifica por la necesidad de analizar y proponer alternativas sostenibles frente a la problemática asociada al manejo y disposición final de residuos peligrosos (RESPEL) en el municipio de Mitú, capital del departamento del Vaupés. En territorios geográficamente aislados y con limitaciones estructurales como Mitú, la gestión de residuos peligrosos representa un desafío que trasciende lo técnico, involucrando dimensiones ambientales, sanitarias, económicas e institucionales. La ausencia de infraestructura local especializada para el tratamiento de estos residuos genera una dependencia permanente de esquemas de transporte hacia otras ciudades, lo cual incrementa los costos operativos, limita la eficiencia del sistema y amplifica los riesgos ambientales asociados al almacenamiento y movilización de desechos peligrosos (IDEAM, 2022).

Desde la perspectiva ambiental, la investigación resulta pertinente debido a los potenciales impactos que el manejo inadecuado de residuos peligrosos puede generar sobre los ecosistemas amazónicos. La región del Vaupés posee una alta sensibilidad ecológica, caracterizada por la presencia de fuentes hídricas estratégicas, biodiversidad y territorios con funciones ambientales esenciales. En este contexto, la implementación de soluciones técnicas adaptadas a las condiciones territoriales constituye un elemento clave para la prevención de riesgos de contaminación y la protección de los recursos naturales (PNUMA, 2019). y contribuye al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados con salud, ciudades sostenibles y producción responsable (United Nations, 2015).

En el ámbito sanitario, la gestión de residuos peligrosos, particularmente los de origen hospitalario, adquiere una relevancia crítica. La exposición a residuos biosanitarios, cortopunzantes, químicos o farmacéuticos representa riesgos directos para la salud pública,

especialmente en escenarios donde los sistemas de almacenamiento, transporte y disposición final presentan restricciones logísticas. La formulación de alternativas locales viables contribuye a fortalecer las condiciones de bioseguridad, reducir riesgos de exposición y optimizar la gestión operativa de los principales generadores institucionales, como la E.S.E. Hospital San Antonio de Mitú (OMS, 2018).

Desde la dimensión económica, la investigación adquiere relevancia al analizar los costos estructurales del modelo actual de gestión, basado en transporte aéreo hacia centros urbanos. La evaluación comparativa de alternativas técnicas permite identificar oportunidades de optimización de recursos públicos, eficiencia operativa y sostenibilidad financiera, aspectos fundamentales en la planificación de políticas públicas ambientales en municipios de baja conectividad (CONPES, 2008).

En el plano institucional, el estudio aporta elementos estratégicos para la toma de decisiones en la gestión pública ambiental. La formulación de propuestas técnicas sustentadas en análisis normativos, diagnósticos territoriales y criterios de factibilidad fortalece la capacidad de planificación municipal, contribuyendo a cerrar brechas entre la regulación nacional y las capacidades locales (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2005). Asimismo, la investigación se alinea con los principios de la gestión ambiental territorial y el desarrollo sostenible, promoviendo enfoques preventivos, eficiencia operativa y fortalecimiento de la gobernanza ambiental.

Finalmente, en el ámbito académico, esta investigación aporta al estudio de la gestión ambiental en contextos amazónicos, donde aún existen vacíos en el análisis de la disposición final de residuos peligrosos en territorios de difícil acceso (PNUMA, 2019; IDEAM, 2022). El trabajo integra dimensiones técnicas, normativas, económicas e institucionales, ofreciendo

insumos que pueden servir como referencia para futuras investigaciones y para la formulación de políticas públicas en territorios con características similares.

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

Formular una propuesta técnica, ambiental, social y económicamente viable para la disposición final de residuos peligrosos (RESPEL) en el municipio de Mitú, departamento del Vaupés, considerando las condiciones territoriales, logísticas y normativas, con el fin de contribuir al fortalecimiento de la gestión ambiental local y la mitigación de riesgos sanitarios y ambientales.

### **Objetivos específicos**

Analizar el contexto territorial, ambiental e institucional del municipio de Mitú en relación con la gestión de residuos peligrosos, identificando las principales limitaciones estructurales del sistema actual.

Caracterizar las fuentes generadoras y los tipos de residuos peligrosos presentes en el municipio, con énfasis en residuos hospitalarios y otras corrientes relevantes de RESPEL.

Examinar el marco normativo y técnico aplicable a la gestión y disposición final de residuos peligrosos en Colombia, evaluando su correspondencia con las condiciones locales.

Evaluar comparativamente las alternativas de disposición final disponibles, considerando criterios técnicos, ambientales, logísticos y económicos.

Analizar la factibilidad técnica, ambiental y económica de la implementación de una solución local para la disposición final de residuos peligrosos en Mitú.

Diseñar una propuesta técnica de disposición final de RESPEL adaptada al contexto territorial del municipio.

Formular lineamientos institucionales y estratégicos orientados al fortalecimiento de la gestión pública ambiental en materia de residuos peligrosos.

## **Marco conceptual y teórico**

### **Residuos peligrosos (RESPEL)**

La gestión de residuos peligrosos constituye un componente crítico dentro de las políticas contemporáneas de protección ambiental y salud pública. En Colombia, los residuos o desechos peligrosos (RESPEL) son definidos como aquellos que, debido a sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables o infecciosas, pueden causar riesgos o daños a la salud humana y al ambiente (Decreto 4741 de 2005). Esta definición reconoce que el riesgo asociado a estos residuos no depende únicamente de su composición, sino también de las condiciones de manejo, almacenamiento, transporte y disposición final (Abarca Guerrero et al., 2013).

Desde una perspectiva jurídica, la regulación de los residuos peligrosos se integra dentro del marco general del sistema ambiental colombiano, el cual reconoce principios rectores orientados a la prevención y control de riesgos ambientales. Bajo este enfoque, el manejo de residuos peligrosos adquiere una dimensión estratégica, en la medida en que su gestión inadecuada puede generar impactos ambientales acumulativos y riesgos sanitarios significativos.

### **Gestión integral de residuos peligrosos**

El enfoque de gestión integral de residuos peligrosos se fundamenta en la necesidad de controlar los riesgos asociados a estos desechos a lo largo de todo su ciclo de vida. En Colombia, este principio se encuentra consagrado en el Decreto 4741 de 2005, el cual establece que la gestión debe comprender etapas articuladas que incluyen la prevención, minimización, segregación, almacenamiento, recolección, transporte, tratamiento y disposición final.

Desde una perspectiva regulatoria, este enfoque se articula con la estructura normativa ambiental vigente, la cual concibe la gestión de residuos peligrosos como una obligación de carácter preventivo orientada a la reducción de riesgos.

## **Disposición final de residuos peligrosos**

La disposición final representa la etapa crítica del sistema de gestión, en la cual los residuos son sometidos a procesos destinados a su eliminación definitiva o confinamiento seguro. Los métodos de disposición final varían en función del tipo de residuo, su peligrosidad y la infraestructura disponible. Entre las tecnologías más empleadas se encuentran la incineración controlada, la inertización, el encapsulamiento y los tratamientos físico-químicos (OMS, 2018).

La incineración constituye una de las tecnologías más difundidas para residuos hospitalarios y corrientes infecciosas, debido a su capacidad para reducir significativamente el volumen y eliminar agentes patógenos. No obstante, su implementación requiere condiciones técnicas rigurosas, controles de emisiones y viabilidad económica (European Environment Agency, 2020).

En contextos territoriales aislados, la literatura técnica resalta la pertinencia de modelos modulares híbridos, que combinan tecnologías térmicas con esquemas de encapsulamiento o confinamiento seguro para residuos residuales. Estos sistemas permiten adaptar la capacidad instalada a volúmenes de generación relativamente bajos, característica común en municipios amazónicos (PNUMA, 2019).

## **Desarrollo sostenible y gestión ambiental**

El marco teórico del presente estudio se sustenta en los principios del desarrollo sostenible, concepto ampliamente difundido a partir del Informe Brundtland, el cual establece la necesidad de equilibrar las dimensiones ambiental, social y económica en los procesos de planificación territorial (World Commission on Environment and Development, 1987).

En el ámbito de la gestión de residuos, este enfoque implica la formulación de soluciones que no solo minimicen impactos ambientales, sino que también consideren la sostenibilidad

financiera, la viabilidad técnica y los efectos sociales asociados. La Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Peligrosos reconoce la importancia de integrar criterios preventivos, eficiencia operativa y fortalecimiento institucional (CONPES, 2008).

En territorios amazónicos, el desarrollo sostenible adquiere una complejidad adicional, dada la sensibilidad ecológica de los ecosistemas y las limitaciones estructurales de conectividad. La formulación de alternativas locales de gestión ambiental se convierte, por tanto, en un elemento estratégico para fortalecer la autonomía territorial y reducir presiones sobre los recursos naturales (PNUMA, 2019).

### **Gestión pública ambiental y enfoque territorial**

Desde la perspectiva de la gestión pública, la problemática de los residuos peligrosos trasciende el ámbito técnico, involucrando procesos de planificación institucional, regulación, financiación y coordinación intersectorial. La literatura en gobernanza ambiental resalta que la eficacia de los sistemas de gestión depende en gran medida de la capacidad institucional local, la articulación normativa y la disponibilidad de infraestructura (IDEAM, 2022).

En el contexto colombiano, esta dimensión institucional se sustenta en la arquitectura del Sistema Nacional Ambiental (SINA), establecida por la Ley 99 de 1993 (Congreso de Colombia, 1993), la cual asigna competencias diferenciadas a las autoridades ambientales regionales y territoriales. En municipios de baja conectividad como Mitú, la gestión pública ambiental enfrenta desafíos asociados a la dependencia externa, limitaciones presupuestales y restricciones tecnológicas.

El enfoque territorial adoptado en esta investigación reconoce que las soluciones de gestión ambiental deben considerar variables geográficas, logísticas, sociales e institucionales,

evitando la aplicación de modelos homogéneos que no responden a las condiciones locales (CONPES, 2008).

En este contexto, la participación de actores no formales en la gestión de residuos ha sido documentada como un elemento relevante en sistemas con limitaciones institucionales (Wilson et al., 2006).

### **Marco normativo**

La gestión de residuos peligrosos en Colombia se encuentra regulada por un conjunto de disposiciones normativas que establecen principios, responsabilidades y procedimientos orientados a garantizar la protección de la salud humana y del ambiente. Este marco regulatorio se sustenta en instrumentos legales, reglamentarios y de política pública que configuran el sistema nacional de gestión ambiental (Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2016).

Desde la perspectiva legal, la Ley 99 de 1993 constituye el fundamento estructural del sistema ambiental colombiano, al crear el Sistema Nacional Ambiental (SINA) y establecer principios rectores como la prevención, la precaución y la responsabilidad ambiental (Congreso de Colombia, 1993). Estos principios resultan particularmente relevantes en la gestión de residuos peligrosos, dado el potencial riesgo que estos desechos representan para los ecosistemas y la salud pública.

En el ámbito reglamentario, el Decreto 4741 de 2005 establece los lineamientos específicos para la prevención y el manejo integral de residuos o desechos peligrosos. Esta norma define las obligaciones de los generadores, transportadores y gestores, incorporando criterios técnicos para la identificación, clasificación, almacenamiento, transporte, tratamiento y disposición final de RESPEL. Asimismo, introduce el principio de responsabilidad extendida,

bajo el cual los actores involucrados deben garantizar la trazabilidad y el manejo ambientalmente seguro de los residuos (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2005).

Complementariamente, el Decreto 1076 de 2015 compila la normativa del sector ambiente, consolidando las disposiciones regulatorias aplicables a la gestión ambiental en el territorio nacional. Este instrumento refuerza la integración normativa del manejo de residuos peligrosos dentro del marco general de control ambiental (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

En relación con los residuos hospitalarios, la Resolución 1164 de 2002 adopta el Manual de Procedimientos para la Gestión Integral de Residuos Hospitalarios y Similares, estableciendo criterios técnicos para la segregación, almacenamiento, desactivación, tratamiento y disposición final. Esta regulación adquiere especial relevancia en el contexto del municipio de Mitú, donde el sector salud constituye la principal fuente generadora de residuos peligrosos (Ministerio de Salud, 2002).

Desde la perspectiva institucional, las funciones de seguimiento, control y vigilancia recaen sobre las autoridades ambientales regionales. Para el departamento del Vaupés, dicha competencia corresponde a la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Norte y Oriente Amazónico (CDA), entidad encargada de ejercer la autoridad ambiental en la jurisdicción (Corporación para el Desarrollo Sostenible del Norte y Oriente Amazónico [CDA], 2021).

En el plano de política pública, el Documento CONPES 3510 de 2008 establece la Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Peligrosos, la cual promueve enfoques preventivos, fortalecimiento institucional, optimización de la trazabilidad y desarrollo de infraestructura especializada. Esta política reconoce la necesidad de adaptar los modelos de

gestión a las condiciones territoriales diferenciadas del país (Consejo Nacional de Política Económica y Social [CONPES], 2008).

En el ámbito internacional, el Convenio de Basilea establece principios orientados al manejo ambientalmente seguro de desechos peligrosos, particularmente en lo relacionado con el control de movimientos transfronterizos. Si bien su aplicación directa se concentra en flujos internacionales, sus principios resultan conceptualmente relevantes para el análisis de sistemas de gestión de RESPEL (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [PNUMA], 2019).

En este contexto, el marco normativo evidencia que la problemática de los residuos peligrosos en Mitú no se origina en la ausencia de regulación, sino en las limitaciones estructurales que condicionan la implementación efectiva de las disposiciones vigentes en territorios con restricciones logísticas, tecnológicas e institucionales diferenciadas (IDEAM, 2022).

## **Metodología**

### **Enfoque metodológico**

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque mixto, integrando componentes cualitativos y cuantitativos con el propósito de analizar de manera integral la problemática asociada a la disposición final de residuos peligrosos (RESPEL) en el municipio de Mitú, departamento del Vaupés. La adopción de este enfoque responde a la naturaleza compleja del fenómeno estudiado, en la medida en que la gestión de residuos peligrosos involucra simultáneamente dimensiones técnicas, logísticas, económicas, normativas e institucionales. En este tipo de contextos, la combinación de estrategias metodológicas permite articular la interpretación de dinámicas institucionales y operativas con el análisis de variables técnicas y de viabilidad (Creswell & Plano Clark, 2018; Hernández-Sampieri, Fernández-Collado, & Baptista-Lucio, 2022).

### **Tipo y alcance de la investigación**

Desde la perspectiva metodológica, la investigación se clasifica como de tipo aplicada, dado que se orienta a la generación de insumos técnicos e institucionales dirigidos a la formulación de alternativas viables frente a una problemática concreta de gestión ambiental territorial. Este tipo de investigación se caracteriza por su énfasis en la resolución de problemas prácticos, manteniendo simultáneamente rigor analítico y coherencia conceptual (Hernández-Sampieri et al., 2022).

El estudio presenta un alcance descriptivo y propositivo. El componente descriptivo permitió caracterizar las condiciones actuales del sistema de gestión de residuos peligrosos en Mitú, particularmente en lo relacionado con la generación, manejo, almacenamiento y transporte de RESPEL. El componente propositivo se enfocó en el diseño de una alternativa técnica de

disposición final adaptada a las restricciones geográficas, logísticas e institucionales del territorio (Hernández-Sampieri et al., 2022; Creswell & Plano Clark, 2018).

### **Diseño metodológico**

El diseño metodológico correspondió a un esquema no experimental de corte transversal. Este tipo de diseño resulta coherente con investigaciones orientadas al análisis de fenómenos en su contexto natural, sin manipulación deliberada de variables, permitiendo examinar prácticas, dinámicas institucionales y condiciones operativas existentes (Kerlinger & Lee, 2002; Hernández-Sampieri et al., 2022).

### **Estrategia metodológica**

La estrategia metodológica de la investigación se estructuró en tres fases complementarias: diagnóstica, analítica y propositiva, las cuales permitieron abordar de manera integral la problemática asociada a la gestión de residuos peligrosos en el municipio de Mitú. Esta organización respondió a la necesidad de desarrollar un proceso secuencial y articulado que facilitara, en primer lugar, la comprensión del contexto territorial e institucional; posteriormente, el análisis comparativo de alternativas técnicas; y, finalmente, la formulación de una propuesta viable ajustada a las condiciones del territorio (Hernández-Sampieri et al., 2022).

### ***Fase diagnóstica***

La fase diagnóstica tuvo como finalidad caracterizar la situación actual del manejo de residuos peligrosos en Mitú. Para ello, se emplearon técnicas de revisión documental, entrevistas semiestructuradas y observación directa (Hernández-Sampieri et al., 2022).

Se realizaron ocho entrevistas semiestructuradas mediante muestreo intencional, priorizando actores con conocimiento directo del sistema de gestión de RESPEL. La información cualitativa fue analizada mediante análisis de contenido temático (Bardin, 2013).

La revisión documental incluyó normativa ambiental, instrumentos de planificación territorial e informes institucionales. La observación directa permitió contrastar información institucional con condiciones operativas reales (Yin, 2018).

### ***Fase analítica***

La fase analítica se orientó al estudio comparativo de alternativas técnicas de disposición final. Dado que la problemática evaluada involucra múltiples dimensiones heterogéneas, se empleó una evaluación multicriterio como herramienta analítica central (Belton & Stewart, 2002; Mendoza & Martins, 2006).

### ***Evaluación multicriterio***

La evaluación comparativa de alternativas se estructuró mediante un modelo de agregación ponderada, técnica ampliamente utilizada en análisis de decisión ambiental (Belton & Stewart, 2002; Mendoza & Martins, 2006). Esta metodología permitió integrar múltiples dimensiones analíticas relevantes para el contexto territorial de Mitú, reconociendo la naturaleza técnica, ambiental, logística, económica e institucional del problema evaluado.

Se definieron cinco dimensiones analíticas: técnica, ambiental, económica, logística e institucional. Cada dimensión incorporó criterios específicos de evaluación, valorados mediante una escala ordinal de cinco niveles (1 = desempeño muy desfavorable; 5 = desempeño muy favorable). Las ponderaciones asignadas reflejaron la relevancia estratégica de cada dimensión en el contexto territorial analizado, particularmente en lo relacionado con restricciones logísticas, riesgos ambientales y viabilidad institucional (Belton & Stewart, 2002).

El resultado de la evaluación se obtuvo mediante la agregación ponderada de los valores asignados a cada alternativa.

**Tabla 1***Dimensiones analíticas del modelo de evaluación*

Dimensión	Justificación analítica
Técnica	Viabilidad operativa y tecnológica
Ambiental	Riesgos e impactos asociados
Económica	Costos estructurales del modelo
Logística	Restricciones de conectividad
Institucional	Factibilidad administrativa y normativa

**Tabla 2***Criterios de evaluación*

Dimensión	Criterios considerados
Técnica	Viabilidad operativa, adaptabilidad, complejidad tecnológica
Ambiental	Riesgo ambiental, control de impactos, sostenibilidad
Económica	Costos operativos, costos a largo plazo
Logística	Dependencia de transporte externo, continuidad operativa
Institucional	Viabilidad administrativa, cumplimiento normativo

*Nota.* Criterios utilizados para evaluar comparativamente las alternativas de disposición final de RESPEL.

**Tabla 3***Escala de valoración*

Valor	Interpretación
1	Desempeño muy desfavorable
2	Desempeño desfavorable
3	Desempeño moderado
4	Desempeño favorable
5	Desempeño muy favorable

*Nota.* La escala de valoración se definió con el fin de estandarizar la evaluación del desempeño de cada alternativa, permitiendo su comparación en función de las dimensiones analíticas establecidas.

**Tabla 4***Ponderación de dimensiones*

<i>Dimensión</i>	<i>Peso (%)</i>
Logística	30%
Ambiental	25%
Institucional	20%
Técnica	15%
Económica	10%

*Nota.* La priorización de la dimensión logística responde a las restricciones estructurales de conectividad del municipio, mientras que la dimensión ambiental considera la sensibilidad ecosistémica del territorio amazónico.

**Componentes del análisis**

La investigación integró de manera articulada un componente cualitativo y un componente cuantitativo, coherentes con el enfoque metodológico mixto adoptado.

El componente cualitativo se orientó a la comprensión de las dinámicas institucionales, administrativas y operativas asociadas a la gestión de residuos peligrosos en el municipio. Este componente se fundamentó en entrevistas semiestructuradas, revisión documental y observación directa, permitiendo identificar limitaciones estructurales, criterios de decisión institucional y restricciones operativas del sistema actual.

El componente cuantitativo se centró en la estimación técnica de la generación de residuos peligrosos (RESPEL). Ante la limitada disponibilidad de registros estadísticos consolidados a nivel municipal, se emplearon factores técnicos referenciales reportados en literatura especializada, particularmente en residuos hospitalarios (OMS, 2018). Este procedimiento permitió desarrollar escenarios estimados consistentes con la naturaleza aplicada del estudio.

### ***Fase propositiva***

La fase propositiva se orientó a la formulación de una alternativa técnica e institucional para la disposición final de residuos peligrosos en el municipio de Mitú. Esta etapa se sustentó en la integración de los hallazgos obtenidos en las fases diagnóstica y analítica, particularmente en lo relacionado con las limitaciones operativas del modelo actual, los riesgos ambientales identificados y los resultados de la evaluación comparativa de alternativas.

En esta fase se estructuró la propuesta de planta local modular híbrida, incorporando criterios de viabilidad técnica, sostenibilidad ambiental, factibilidad económica y coherencia institucional. El desarrollo de la propuesta no se concibió como un ejercicio de diseño de ingeniería detallada, sino como una formulación conceptual y estratégica orientada a la toma de decisiones públicas, consistente con la naturaleza aplicada de la investigación.

Asimismo, se definieron lineamientos institucionales y de gobernanza orientados a la implementación potencial de la alternativa propuesta, considerando las capacidades administrativas locales, el marco normativo vigente y las restricciones logísticas del territorio (Aguilar, 2006; Ostrom, 1990).

### **Población del estudio**

La población de estudio estuvo conformada por actores institucionales vinculados directa o indirectamente a la gestión de residuos peligrosos (RESPEL) en el municipio de Mitú. Esta población incluyó representantes del sector salud, autoridades ambientales, actores de la administración municipal y generadores potenciales de residuos peligrosos asociados a actividades mecánicas y comerciales.

### *Selección de participantes y entrevistas*

La selección de los ocho (8) informantes clave se estructuró bajo un diseño de muestreo no probabilístico intencional, respondiendo a la configuración demográfica e institucional del municipio de Mitú. Al tratarse de un territorio con baja densidad empresarial y alta centralización administrativa, la muestra alcanzó la saturación teórica estructural rápidamente (Hernández-Sampieri et al., 2022). Esto significa que se logró abarcar la totalidad del universo de toma de decisiones aplicable al problema: la E.S.E. Hospital San Antonio como generador mayoritario, la CDA como autoridad de control, y la Alcaldía como ente planificador. El razonamiento analítico detrás del procesamiento de estas entrevistas consistió en una triangulación deductiva: se contrastó la viabilidad normativa percibida por las instituciones con la realidad operativa manifestada por los talleres mecánicos, permitiendo estructurar las dimensiones de la evaluación multicriterio a partir de las fallas sistémicas reales del territorio y no de supuestos teóricos (Bardin, 2013; Yin, 2018).

### **Tabla 5**

#### *Actores institucionales entrevistados*

<i>Tipo de actor</i>	<i>Número de entrevistas</i>
<i>Sector salud (Hospital San Antonio de Mitú)</i>	<i>2</i>
<i>Administración municipal</i>	<i>2</i>
<i>Autoridad ambiental regional</i>	<i>1</i>
<i>Talleres mecánicos</i>	<i>2</i>
<i>Otros actores institucionales</i>	<i>1</i>
<i>Total</i>	<i>8</i>

*Nota.* Los participantes fueron seleccionados mediante muestreo intencional, priorizando actores institucionales con conocimiento directo sobre la gestión de residuos peligrosos (RESPEL).

**Integración metodológica**

La integración de componentes cualitativo y cuantitativo se realizó mediante triangulación de información (Hernández-Sampieri et al., 2022; Yin, 2018).

**Limitaciones metodológicas**

Se reconoce que las estimaciones técnicas y económicas corresponden a escenarios preliminares. La ausencia de series estadísticas consolidadas implicó el uso de rangos referenciales, procedimiento metodológicamente válido en contextos territoriales con restricciones de información.

**Consideraciones éticas**

La investigación se desarrolló bajo principios de integridad académica y confidencialidad, en coherencia con lineamientos éticos aplicables (American Psychological Association [APA], 2020).

### **Resultados, análisis y evaluación del sistema de gestión de RESPEL en Mitú**

El presente capítulo expone los resultados obtenidos a partir del desarrollo metodológico de la investigación, orientados al análisis integral de la gestión de residuos peligrosos (RESPEL) en el municipio de Mitú, departamento del Vaupés. En coherencia con los objetivos planteados, se abordan de manera articulada las dimensiones técnica, ambiental, normativa, logística e institucional que configuran el sistema local de manejo de este tipo de residuos (Yin, 2018).

El análisis se estructura a partir de la caracterización de las fuentes generadoras, la evaluación de las prácticas actuales de gestión, la estimación técnica de la generación de residuos peligrosos, la revisión del marco normativo aplicable y la evaluación comparativa de alternativas de disposición final. Esta aproximación permite comprender la problemática desde una perspectiva sistémica, identificando tanto las limitaciones estructurales como las oportunidades de fortalecimiento de la gestión ambiental territorial.

En contextos geográficamente aislados como Mitú, la gestión de residuos peligrosos se encuentra condicionada por factores logísticos, restricciones de infraestructura y capacidades institucionales diferenciadas. En este sentido, los resultados presentados no solo describen el estado actual del sistema, sino que también permiten sustentar la formulación de una propuesta técnica de disposición final adaptada a las condiciones del territorio.

### **Contexto territorial, ambiental e institucional del sistema de gestión de RESPEL en Mitú**

El análisis del sistema de gestión de residuos peligrosos en el municipio de Mitú exige una comprensión integral del contexto territorial, ambiental e institucional que condiciona su funcionamiento. En territorios amazónicos de difícil acceso, la gestión de RESPEL no depende exclusivamente de variables técnicas, sino de restricciones estructurales asociadas a la

conectividad, disponibilidad de infraestructura, capacidades administrativas y sensibilidad ecosistémica (Alcaldía de Mitú, 2020; PNUMA, 2019; IDEAM, 2022).

Desde la dimensión territorial, la limitada conectividad terrestre del municipio configura una dependencia logística significativa del transporte aéreo, lo que introduce vulnerabilidades operativas y presiones económicas estructurales. En términos ambientales, la localización del municipio en un ecosistema amazónico de alta fragilidad ecológica amplifica los riesgos asociados al almacenamiento prolongado, manejo inadecuado y disposición final de residuos peligrosos.

En el plano institucional, si bien el marco normativo nacional establece obligaciones claras en materia de gestión integral de RESPEL, la capacidad real de implementación a escala municipal enfrenta limitaciones derivadas de restricciones presupuestales, ausencia de infraestructura especializada y dinámicas de gobernanza ambiental diferenciadas.

Este contexto estructural constituye el marco analítico dentro del cual se desarrolló el diagnóstico del sistema actual de gestión de residuos peligrosos.

### **Resultados de las entrevistas a actores institucionales**

Las entrevistas semiestructuradas realizadas a actores institucionales permitieron identificar percepciones relevantes sobre las condiciones actuales de la gestión de residuos peligrosos (RESPEL) en el municipio de Mitú. La información obtenida aportó elementos cualitativos que complementan el análisis documental y el diagnóstico técnico desarrollado en la investigación.

En general, los entrevistados coincidieron en señalar que el principal desafío del sistema de gestión de RESPEL en el municipio corresponde a la ausencia de infraestructura local para el tratamiento y disposición final de estos residuos. Esta situación genera una dependencia

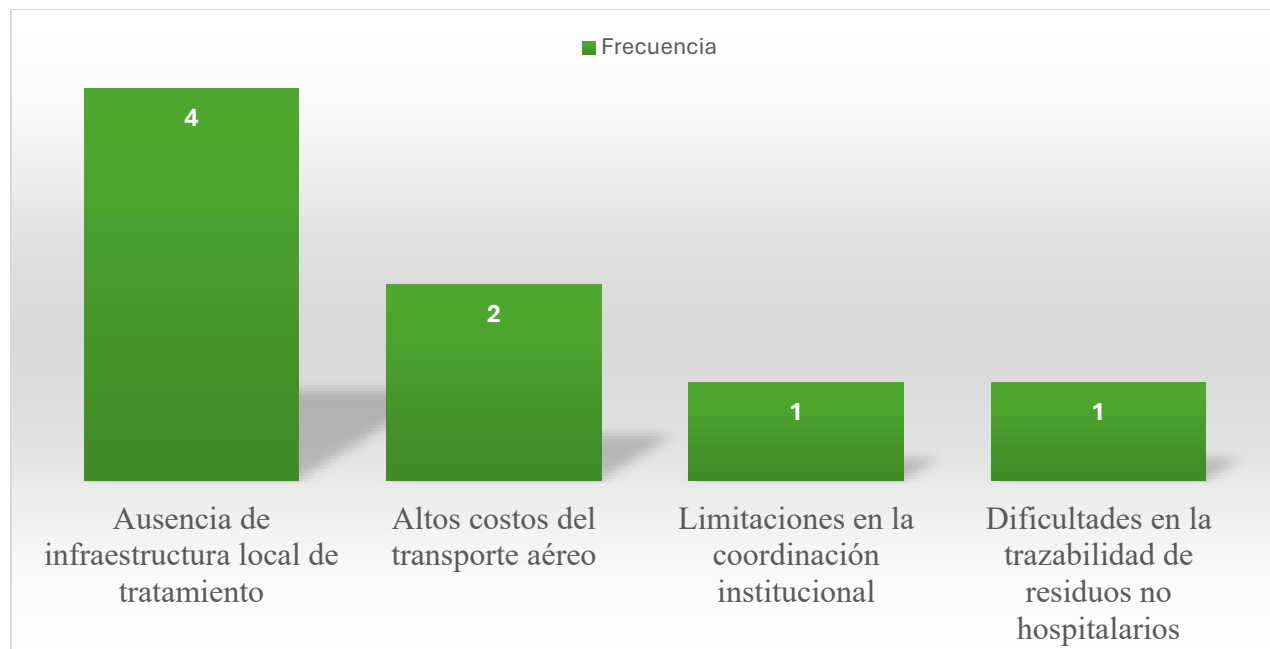
estructural del transporte aéreo hacia otras ciudades, lo que implica costos elevados, restricciones logísticas y mayores tiempos de almacenamiento temporal.

Asimismo, varios participantes señalaron dificultades relacionadas con la articulación institucional entre los actores responsables de la gestión de residuos, así como limitaciones en la trazabilidad de algunos flujos de residuos peligrosos generados por actividades económicas distintas al sector salud.

En términos generales, las percepciones recogidas a través de las entrevistas refuerzan los resultados obtenidos en el diagnóstico territorial y evidencian la necesidad de evaluar alternativas técnicas que permitan fortalecer la autonomía del municipio en la gestión de residuos peligrosos (IDEAM, 2022; CONPES, 2008).

### Figura 1

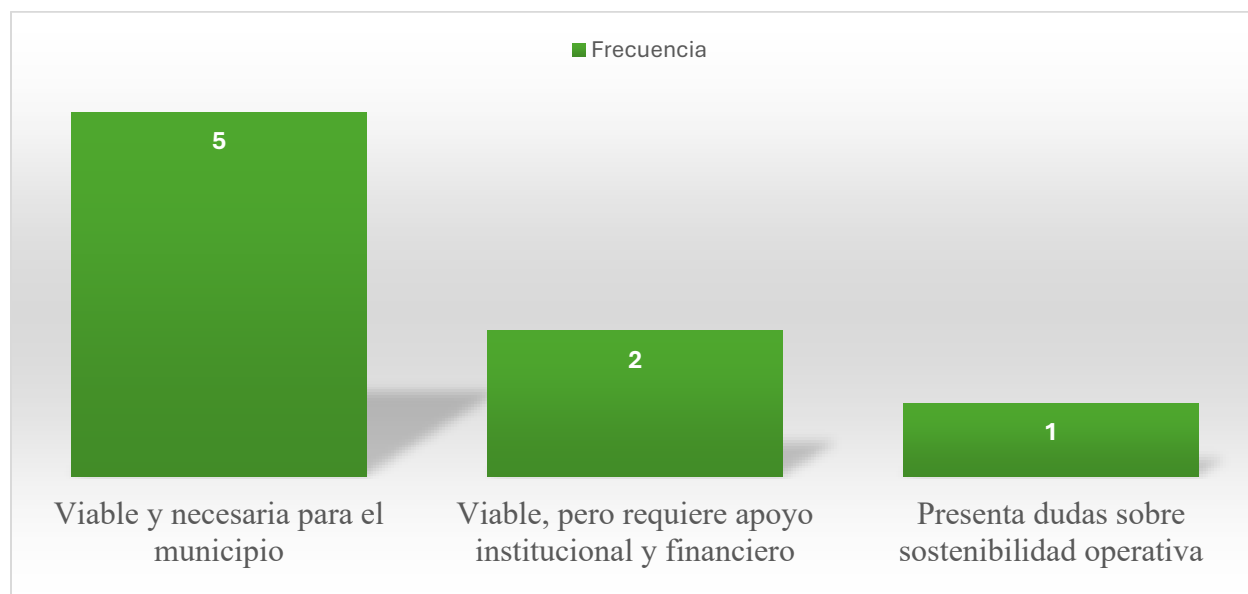
*Principales problemáticas identificadas en la gestión de RESPEL en Mitú*



Nota. Resultados obtenidos a partir de ocho entrevistas semiestructuradas realizadas a actores institucionales vinculados a la gestión de residuos peligrosos en el municipio de Mitú.

**Figura 2**

*Percepción institucional sobre la implementación de una solución local de tratamiento de RESPEL*



**Nota.** Elaboración propia con base en las entrevistas realizadas durante el desarrollo de la investigación.

La mayoría de los entrevistados considera viable la implementación de una solución local para el tratamiento de residuos peligrosos en el municipio de Mitú. No obstante, algunos participantes señalaron que la sostenibilidad del sistema dependería del fortalecimiento institucional, la disponibilidad de recursos financieros y la coordinación entre las entidades responsables de la gestión ambiental y sanitaria.

### **Caracterización de fuentes generadoras y tipos de residuos peligrosos en Mitú**

La gestión de residuos peligrosos (RESPEL) en Colombia se encuentra regulada por un marco normativo nacional que define responsabilidades específicas para generadores, transportadores y gestores autorizados. Entre los principales instrumentos se destacan el Decreto 4741 de 2005, el cual establece los lineamientos para la prevención y el manejo integral de

residuos peligrosos, así como la Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Peligrosos, orientada a fortalecer los mecanismos de control, seguimiento y trazabilidad (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2005).

En este contexto, las autoridades ambientales regionales asumen funciones clave relacionadas con el registro, vigilancia y control de los generadores. Para el departamento del Vaupés, dicha competencia recae sobre la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Norte y Oriente Amazónico (CDA), entidad encargada de ejercer la autoridad ambiental en la jurisdicción (CDA, 2021).

No obstante, las condiciones geográficas, logísticas y de conectividad propias del municipio de Mitú han limitado el desarrollo de infraestructura local destinada al tratamiento especializado de residuos peligrosos. Esta situación ha sido reconocida en estudios nacionales, los cuales señalan que la infraestructura de tratamiento de RESPEL se concentra principalmente en el centro del país, dejando a regiones amazónicas en condición de dependencia externa (IDEAM, 2022).

A nivel nacional, el seguimiento a la generación de residuos peligrosos se realiza mediante el Registro de Generadores administrado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), herramienta que permite identificar sectores generadores, corrientes de residuos y tendencias de producción (IDEAM, 2022).

### ***Generación de residuos peligrosos en Mitú***

En el municipio de Mitú, la generación de residuos peligrosos se concentra principalmente en el sector salud, seguido por actividades asociadas al mantenimiento mecánico, combustibles, residuos químicos y envases contaminados. Este patrón resulta consistente con las

tendencias nacionales reportadas por el IDEAM (2022), donde el sector hospitalario figura como uno de los principales generadores de RESPEL.

El principal generador institucional del municipio corresponde a la E.S.E. Hospital San Antonio de Mitú, único hospital de segundo nivel presente en el territorio. Esta institución es responsable de la mayor producción de residuos biosanitarios, anatomopatológicos, cortopunzantes y farmacéuticos, derivados de la prestación de servicios de salud.

Adicionalmente, el municipio cuenta con unidades de atención primaria y centros de salud rurales que generan residuos hospitalarios en menor escala. Estos residuos suelen ser acumulados temporalmente en los puntos de generación antes de su consolidación para transporte externo.

De forma complementaria, la generación de RESPEL se encuentra asociada a actividades económicas urbanas, particularmente talleres de motocicletas y mecánica general, los cuales producen aceites usados, filtros contaminados, solventes y materiales impregnados con hidrocarburos. Asimismo, se identifican corrientes de residuos peligrosos vinculadas al sector de combustibles, actividades agrícolas y el manejo doméstico inadecuado de productos químicos y medicamentos.

La ausencia de un sistema de tratamiento local especializado genera una acumulación operativa de residuos y refuerza la dependencia de esquemas de evacuación externa.

### ***Transporte y disposición actual de los residuos***

Debido a la inexistencia de infraestructura local para el tratamiento de residuos peligrosos, los RESPEL generados en Mitú deben ser transportados hacia ciudades con capacidad técnica instalada. Este transporte se realiza principalmente por vía aérea, condición derivada de la limitada conectividad terrestre del municipio.

El modelo actual implica una cadena logística compleja que incluye almacenamiento temporal prolongado, embalaje especializado, transporte aéreo y tratamiento final en plantas autorizadas. La literatura especializada advierte que este esquema incrementa significativamente los costos operativos y amplifica los riesgos asociados al manejo de residuos infecciosos y químicos (OMS, 2018).

### ***Problemáticas identificadas***

El análisis diagnóstico permite identificar limitaciones estructurales relevantes. La inexistencia de una planta local de tratamiento de RESPEL constituye el principal factor de vulnerabilidad del sistema, generando una dependencia total del transporte aéreo. Este modelo introduce presiones económicas constantes, particularmente en el sector salud, y limita la eficiencia operativa del manejo de residuos.

Adicionalmente, se evidencian dificultades relacionadas con la trazabilidad de residuos no hospitalarios, riesgos asociados al almacenamiento prolongado y una limitada integración entre los instrumentos de política pública local y la gestión operativa de residuos peligrosos.

Los antecedentes sancionatorios ambientales registrados en el municipio refuerzan la evidencia sobre la necesidad de fortalecer los mecanismos técnicos e institucionales de gestión.

### ***Brechas del sistema actual***

Al profundizar en el comportamiento real de las fuentes generadoras, el diagnóstico revela una profunda fragmentación que responde directamente a los incentivos económicos del territorio. Por un lado, el sector institucional, encabezado por la E.S.E. Hospital San Antonio, asume los altos sobrecostos logísticos del manejo de RESPEL bajo una estricta coerción normativa. Por otro lado, en el sector comercial urbano (específicamente talleres de motocicletas

y mecánica), el residuo peligroso se percibe como una externalidad negativa cuya evacuación formal resulta económicamente inviable bajo el actual modelo de flete aéreo (IDEAM, 2022).

Esta barrera económica estructural es el principal detonante de la disposición informal e inadecuada en el municipio. En consecuencia, el éxito de una planta local no depende exclusivamente de su viabilidad técnica, sino de la capacidad institucional de la administración municipal para modificar este comportamiento ciudadano. Es imperativo que la Alcaldía transite hacia un esquema de gobernanza ambiental más estricto, articulando la prestación del servicio de tratamiento con los instrumentos de control territorial (Rodríguez & Espinoza, 2018).

La propuesta exige implementar una estrategia de corresponsabilidad coercitiva: condicionar la expedición y renovación de los permisos de funcionamiento comercial a la certificación mensual de entrega de residuos en la planta municipal. Solo mediante esta articulación institucional se logrará transformar la percepción del residuo peligroso de una carga financiera inmanejable a una obligación operativa ineludible, garantizando así el volumen de recaudo necesario para la sostenibilidad de la planta (PNUMA, 2021).

### ***Evaluación multicriterio de alternativas de disposición final***

Con el propósito de estructurar una comparación integral entre las alternativas analizadas, se aplicó una evaluación multicriterio basada en un modelo de agregación ponderada. Este ejercicio permitió integrar variables técnicas, ambientales, logísticas, económicas e institucionales, reconociendo que la selección de soluciones para la disposición final de residuos peligrosos en contextos territoriales complejos no depende de un único criterio de decisión.

La asignación de ponderaciones no se realizó de forma simétrica, sino que obedeció a un análisis de sensibilidad territorial que refleja las restricciones estructurales del municipio de Mitú. Se otorgó el peso jerárquico más alto a la dimensión Logística (30%) y a la Ambiental

(25%), partiendo de la premisa de que, en un ecosistema amazónico aislado, la incapacidad de evacuar residuos (vulnerabilidad logística) se traduce inmediatamente en un riesgo de contaminación irreversible (vulnerabilidad ambiental) (Belton & Stewart, 2002; Mendoza & Martins, 2006). Por su parte, se ponderó la dimensión Institucional (20%), la Técnica (15%) y la Económica (10%), consolidando un esquema reflexivo que prioriza la protección de la salud pública y la autonomía local por encima de las restricciones presupuestales de corto plazo.

**Tabla 6**

*Evaluación multicriterio de alternativas de disposición final de RESPEL*

<b>Criterio</b>	<b>Peso</b>	<b>Transporte externo</b>	<b>Planta local modular</b>
Viabilidad técnica	0,30	1	4
Impacto ambiental	0,25	2	4
Viabilidad logística	0,20	1	4
Costo operativo	0,15	2	4
Autonomía institucional	0,10	2	3
<b>Resultado ponderado</b>	<b>1,00</b>	<b>1,50</b>	<b>3,90</b>

### *Interpretación analítica*

Los puntajes de desempeño asignados a cada alternativa surgieron del análisis costo-beneficio y de la contrastación de sus respectivas vulnerabilidades. Los resultados de la evaluación evidencian que el modelo actual de transporte aéreo demuestra una falla estructural irresoluble, obteniendo un desempeño de apenas 1,50. Si bien el transporte externo constituye una práctica normativamente válida, su alta dependencia de variables logísticas foráneas introduce vulnerabilidades operativas, costos estructurales elevados y restricciones severas en la sostenibilidad del sistema (IDEAM, 2022; PNUMA, 2021).

En contraste, la alternativa de la planta local justifica técnicamente su superioridad analítica al alcanzar un desempeño óptimo de 3,90. Este modelo presenta ventajas comparativas evidentes en términos de continuidad operativa, reducción de riesgos de contaminación y

fortalecimiento de la gobernanza territorial. Desde una perspectiva integral, la evaluación multicriterio permite sustentar firmemente la selección de la planta local modular como la opción prioritaria bajo criterios técnicos, ambientales, logísticos e institucionales.

### ***Análisis financiero preliminar***

El análisis financiero se desarrolló bajo un horizonte de evaluación de diez (10) años, considerando que este periodo resulta adecuado para infraestructuras ambientales de escala municipal. Los valores económicos fueron estimados en términos constantes, con el fin de facilitar la comparación entre escenarios. El análisis permitió identificar un periodo estimado de recuperación de la inversión entre el año 6 y 7 de operación, asociado principalmente a la reducción de costos de transporte aéreo y a la optimización del manejo local de residuos peligrosos.

Los resultados evidencian que la alternativa local presenta ventajas en términos de costos estructurales de largo plazo, particularmente al reducir la dependencia de costos logísticos variables asociadas al transporte aéreo.

### **Análisis normativo e institucional de la gestión de residuos peligrosos (RESPEL)**

La gestión de residuos peligrosos (RESPEL) en Colombia se encuentra regulada por un marco normativo robusto que establece principios, responsabilidades y procedimientos orientados a garantizar la protección de la salud humana y del ambiente. Este marco se fundamenta principalmente en el Decreto 4741 de 2005, norma que define los lineamientos para la prevención y el manejo integral de residuos peligrosos en el territorio nacional (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2005).

El Decreto 4741 de 2005 establece que los generadores de RESPEL son responsables del manejo integral de los residuos desde su generación hasta su disposición final, incorporando

obligaciones relacionadas con la identificación, clasificación, almacenamiento, transporte, tratamiento y control de estos desechos. Asimismo, introduce el principio de responsabilidad extendida, bajo el cual los actores involucrados en la cadena de gestión deben garantizar la trazabilidad y el manejo ambientalmente seguro de los residuos (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2005).

Complementariamente, la Resolución 1164 de 2002 adopta el Manual de Procedimientos para la Gestión Integral de Residuos Hospitalarios y Similares, instrumento técnico que define los criterios para la segregación, almacenamiento, desactivación, tratamiento y disposición final de residuos generados en establecimientos de salud (Ministerio de Salud, 2002). Esta norma adquiere especial relevancia en el contexto del municipio de Mitú, donde el sector hospitalario constituye la principal fuente generadora de residuos peligrosos.

Desde la perspectiva institucional, el marco normativo colombiano asigna funciones de control, seguimiento y vigilancia a las autoridades ambientales regionales. En el caso del departamento del Vaupés, dicha competencia recae sobre la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Norte y Oriente Amazónico (CDA), entidad encargada de ejercer la autoridad ambiental en la jurisdicción (CDA, 2021).

No obstante, el análisis del contexto territorial evidencia que, a pesar de la existencia de un marco normativo sólido, su implementación efectiva enfrenta limitaciones estructurales en municipios de difícil acceso como Mitú. Diversos estudios han señalado que la gestión de residuos peligrosos en regiones periféricas del país presenta brechas operativas derivadas de la ausencia de infraestructura especializada, limitaciones logísticas y restricciones presupuestales (IDEAM, 2022).

En el ámbito local, la inexistencia de instalaciones autorizadas para el tratamiento o disposición final de RESPEL genera una tensión entre las exigencias normativas y las capacidades reales del territorio. El Decreto 4741 de 2005 exige la implementación de sistemas integrales de manejo, sin embargo, la viabilidad de estas obligaciones depende en gran medida de la disponibilidad de operadores y tecnologías adecuadas (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2005).

Esta situación se traduce en una dependencia estructural del transporte externo de residuos peligrosos hacia ciudades con infraestructura de tratamiento, generalmente mediante transporte aéreo. La literatura especializada advierte que este modelo, aunque normativamente válido, incrementa los costos logísticos y dificulta la sostenibilidad financiera de los sistemas municipales de gestión de residuos (OMS, 2018).

Adicionalmente, el análisis institucional revela que la gestión de RESPEL en Mitú se encuentra fragmentada entre múltiples actores, incluyendo generadores, operadores logísticos, autoridades ambientales y entidades territoriales. Esta dinámica coincide con lo descrito en estudios sobre gobernanza ambiental, los cuales señalan que la falta de infraestructura local suele debilitar la articulación interinstitucional y limitar la eficiencia de los sistemas de gestión (Rodríguez & Espinoza, 2018). lo cual coincide con estudios que evidencian que la eficiencia del sistema depende del modelo institucional adoptado y su nivel de articulación (Massoud et al., 2003).

El antecedente de la Resolución DSV-039-21 emitida por la CDA en 2021, mediante la cual se impusieron medidas correctivas relacionadas con la disposición inadecuada de residuos en el botadero municipal, refuerza la evidencia sobre las debilidades estructurales del sistema

local (CDA, 2021). Este hecho pone de manifiesto la necesidad de fortalecer los instrumentos técnicos, operativos e institucionales que permitan garantizar el cumplimiento normativo.

En este contexto, el análisis normativo e institucional permite concluir que la problemática de los residuos peligrosos en Mitú no se origina en la ausencia de regulación, sino en la brecha existente entre las exigencias normativas y las capacidades técnicas, logísticas e institucionales del territorio. Esta brecha justifica la formulación de alternativas locales que permitan avanzar hacia modelos de gestión más autónomos, eficientes y sostenibles.

### **Estimación técnica de la generación de residuos peligrosos (RESPEL)**

La estimación de la generación de residuos peligrosos (RESPEL) en el municipio de Mitú se desarrolló mediante un enfoque técnico de proyección media realista, considerando la información diagnóstica recolectada, la estructura del sistema de salud local, la caracterización de actividades generadoras y referencias técnicas nacionales e internacionales sobre tasas de generación de residuos peligrosos.

La literatura especializada reconoce que, en contextos donde no existen registros estadísticos consolidados, la estimación de RESPEL puede fundamentarse en factores de generación referenciales ampliamente aceptados (OMS, 2018). Este enfoque resulta particularmente pertinente en territorios de difícil acceso como Mitú, donde la disponibilidad de datos históricos cuantitativos es limitada.

### ***Estimación de residuos hospitalarios***

El principal generador de residuos peligrosos en el municipio corresponde al sector salud, liderado por la E.S.E. Hospital San Antonio de Mitú. Diversos estudios técnicos establecen que los establecimientos hospitalarios generan residuos peligrosos en rangos que oscilan entre 0,5 kg

y 2,0 kg por cama por día, dependiendo del nivel de complejidad, tipo de servicios y contexto operativo (OMS, 2018).

Considerando que el hospital de Mitú corresponde a una institución de segundo nivel de complejidad, con predominio de servicios clínicos generales, se adoptó un escenario de generación media referencial de:  $\approx 1,0$  kg de RESPEL por cama por día. (OMS, 2018).

Este valor es ampliamente utilizado en estudios de planificación ambiental y análisis de factibilidad en sistemas hospitalarios intermedios.

Bajo este criterio técnico, y considerando la operación continua de los servicios de salud, se estima que la generación anual de residuos peligrosos hospitalarios en Mitú se sitúa en un rango aproximado entre: 18 y 30 toneladas/año

Este intervalo incorpora variaciones operativas asociadas a la ocupación hospitalaria, intensidad de servicios, campañas sanitarias y fluctuaciones en la demanda de atención médica.

### ***Residuos peligrosos de origen mecánico***

Las actividades de mantenimiento mecánico, particularmente talleres de motocicletas y reparación de motores constituyen una fuente relevante de residuos peligrosos en la cabecera municipal. Estas actividades generan corrientes típicas como aceites usados, filtros contaminados, solventes y materiales impregnados con hidrocarburos.

Referencias técnicas nacionales señalan que pequeños talleres pueden generar entre 50 kg y 300 kg/año de residuos peligrosos, dependiendo de la intensidad de operación (IDEAM, 2022).

Considerando la dinámica urbana del municipio y un escenario medio realista, se estima que la generación anual asociada a este sector oscila entre: 1,5 y 3,0 toneladas/año

### ***Residuos químicos y envases contaminados***

El municipio presenta igualmente generación dispersa de residuos peligrosos asociados al manejo de productos químicos domésticos, medicamentos vencidos y envases contaminados de origen agrícola. Estas corrientes suelen caracterizarse por baja trazabilidad y alta dispersión, fenómeno ampliamente documentado en territorios amazónicos (PNUMA, 2021).

Bajo un escenario técnico de proyección media, se estima que este flujo representa un volumen aproximado entre: 0,8 y 2,0 toneladas/año

### ***Generación total estimada de RESPEL***

Integrando los flujos proyectados, la generación total estimada de residuos peligrosos en el municipio de Mitú se sitúa en un rango aproximado entre: **20 y 35 toneladas/año**

Este resultado refleja un volumen moderado pero constante, característica típica de municipios intermedios con predominio de generación hospitalaria.

### ***Interpretación técnica de la estimación***

Desde una perspectiva de planificación ambiental, la generación estimada indica que el municipio produce volúmenes que, aunque no justifican infraestructura industrial de gran escala, sí resultan compatibles con soluciones modulares especializadas.

La literatura técnica reconoce que plantas modulares híbridas representan alternativas viables en territorios con generación media de RESPEL, permitiendo optimizar costos, reducir riesgos logísticos y fortalecer la autonomía territorial (OMS, 2018; PNUMA, 2021).

En consecuencia, la estimación de generación obtenida constituye un insumo fundamental para el análisis de factibilidad técnica, económica y operativa de una planta local de tratamiento de residuos peligrosos.

## **Evaluación comparativa de alternativas de disposición final de residuos peligrosos (RESPEL)**

En coherencia con el objetivo específico orientado a la evaluación comparativa de alternativas, se analizaron las opciones disponibles para la disposición final de residuos peligrosos en el municipio de Mitú.

La evaluación comparativa de alternativas constituye un componente fundamental en estudios de gestión ambiental aplicada, ya que permite analizar de manera integral la viabilidad técnica, económica, ambiental y operativa de los modelos de manejo de residuos peligrosos (Hernández-Sampieri et al., 2022).

En el contexto del municipio de Mitú, la ausencia de infraestructura local para el tratamiento de residuos peligrosos ha consolidado un modelo operativo basado en el transporte aéreo hacia ciudades con capacidad técnica instalada. En contraste, la presente investigación plantea la evaluación de una alternativa local consistente en la implementación de una planta modular híbrida para el tratamiento y disposición final de RESPEL.

El análisis comparativo se desarrolló bajo un enfoque multicriterio, considerando variables económicas, logísticas, ambientales e institucionales, conforme a los lineamientos empleados en estudios de factibilidad ambiental (IDEAM, 2022; PNUMA, 2021).

### ***Alternativa 1: Transporte aéreo de residuos peligrosos***

El modelo actual de gestión de RESPEL en Mitú se sustenta en el almacenamiento temporal de residuos en las fuentes generadoras, seguido de su evacuación hacia otras ciudades mediante transporte aéreo. Este esquema responde a la inexistencia de instalaciones locales autorizadas para el tratamiento especializado.

Diversos estudios han señalado que el transporte aéreo de residuos peligrosos en territorios aislados implica costos logísticos significativamente superiores a los sistemas convencionales (OMS, 2018). Estos costos incorporan procesos de embalaje especializado, manipulación, restricciones operativas y tarifas de carga aérea.

Referencias técnicas indican que el costo de transporte y disposición externa de residuos peligrosos en zonas de difícil acceso puede oscilar entre \$8.000 y \$18.000 COP/kg (IDEAM, 2022). En coherencia con un escenario medio realista de análisis, se adoptó un valor referencial de aproximadamente \$12.000 COP/kg.

Considerando la generación estimada de RESPEL en Mitú, el costo anual del modelo actual se proyecta en un rango aproximado entre: \$240.000.000 y \$420.000.000 COP/año. Desde una perspectiva operativa, este modelo presenta sensibilidad a variaciones en tarifas aéreas, disponibilidad de vuelos, restricciones logísticas y tiempos de evacuación.

### ***Alternativa 2: Planta local de tratamiento y disposición final***

La alternativa propuesta en esta investigación consiste en la implementación de una planta modular híbrida municipal para el tratamiento de residuos peligrosos. Este modelo incorpora tecnologías de tratamiento térmico controlado y sistemas de encapsulamiento para residuos residuales.

El diseño de sistemas de tratamiento de residuos debe considerar criterios de eficiencia operativa, control ambiental y sostenibilidad económica (Tchobanoglous & Kreith, 2002).

La literatura técnica reconoce que las plantas modulares representan soluciones viables en territorios con generación media de RESPEL, permitiendo reducir costos logísticos estructurales y fortalecer la autonomía territorial (PNUMA, 2021).

Estudios de factibilidad ambiental en contextos similares indican que la inversión inicial para este tipo de infraestructura puede situarse en rangos aproximados entre \$1.800 y \$2.800 millones COP, dependiendo de la capacidad instalada y especificaciones técnicas (PNUMA, 2021).

Bajo un escenario medio realista, se proyecta: Inversión estimada:  $\approx$  \$2.300 millones COP. En términos operativos, los costos anuales de funcionamiento se estiman entre: \$180.000.000 y \$260.000.000 COP/año. (PNUMA, 2021). Adoptando un valor medio referencial:  $\approx$  \$220.000.000 COP/año

### ***Comparación económica de alternativas***

Desde la perspectiva financiera, el análisis comparativo evidencia que el modelo actual basado en transporte aéreo presenta costos anuales recurrentes que, en escenarios medios, pueden igualar o superar los costos operativos de una planta local.

Diversos estudios han señalado que, en sistemas de gestión de residuos peligrosos en territorios aislados, los costos logísticos representan el principal componente de presión presupuestal (IDEAM, 2022).

Si bien la alternativa local implica una inversión inicial significativa, esta permite estabilizar los costos operativos en el tiempo y reducir la dependencia de variables externas como tarifas aéreas, disponibilidad de rutas y restricciones logísticas.

Este comportamiento resulta consistente con los resultados del análisis financiero preliminar, en el cual se identificó un periodo estimado de recuperación de la inversión entre el año 6 y 7 de operación, asociado a la reducción de costos logísticos estructurales.

### ***Comparación ambiental y operativa***

Desde la dimensión ambiental, el modelo actual introduce riesgos asociados al almacenamiento temporal prolongado y al transporte de residuos infecciosos y químicos. La Organización Mundial de la Salud advierte que el manejo extendido de residuos hospitalarios puede incrementar la exposición a riesgos biológicos y ambientales (OMS, 2018).

La alternativa local permite reducir los tiempos de almacenamiento, minimizar riesgos de transporte y fortalecer el control territorial de los flujos de residuos peligrosos.

En términos operativos, la planta municipal mejora la trazabilidad, optimiza los tiempos de respuesta y permite desarrollar capacidades técnicas locales.

### ***Comparación institucional y territorial***

Desde la perspectiva institucional, la dependencia externa limita la autonomía ambiental del municipio y restringe la capacidad de planificación territorial. La literatura sobre gobernanza ambiental señala que la disponibilidad de infraestructura local fortalece la gestión pública, la articulación interinstitucional y la sostenibilidad de los sistemas ambientales (Rodríguez & Espinoza, 2018).

La alternativa local promueve la consolidación de capacidades técnicas, la generación de empleo especializado y el fortalecimiento de la gestión ambiental municipal.

### ***Síntesis del análisis comparativo***

El análisis comparativo evidencia que el modelo actual, aunque normativamente válido, presenta limitaciones estructurales en términos económicos, logísticos y ambientales. La alternativa local, sustentada en una planta modular híbrida, emerge como una opción viable desde una perspectiva técnica, operativa y territorial.

Este resultado constituye la base para el análisis integral de factibilidad desarrollado en la siguiente sección.

### **Análisis integral de factibilidad del modelo propuesto**

En coherencia con el objetivo específico orientado al análisis de la factibilidad técnica, ambiental y económica, se evaluó la viabilidad integral de la implementación de una solución local para la disposición final de residuos peligrosos en el municipio de Mitú.

El análisis integral de factibilidad constituye una herramienta fundamental en estudios de gestión ambiental aplicada, ya que permite evaluar la viabilidad de una alternativa considerando de manera conjunta variables técnicas, económicas, ambientales, logísticas e institucionales (Hernández-Sampieri et al., 2022).

En el marco de la presente investigación, el análisis se orienta a determinar la viabilidad de implementar una planta modular híbrida para el tratamiento y disposición final de residuos peligrosos (RESPEL) en el municipio de Mitú, bajo criterios de sostenibilidad territorial.

#### ***Factibilidad técnica***

Desde la perspectiva técnica, la generación estimada de RESPEL en Mitú, situada en un rango aproximado entre 20 y 35 toneladas/año, indica un volumen moderado pero constante. La literatura especializada reconoce que este tipo de generación resulta compatible con soluciones modulares de tratamiento, diseñadas para operar en territorios con baja densidad poblacional y flujos controlados de residuos (PNUMA, 2021).

Las plantas modulares híbridas, que combinan tecnologías de tratamiento térmico controlado y sistemas de encapsulamiento, han sido ampliamente implementadas en regiones aisladas, particularmente en contextos amazónicos y rurales (PNUMA, 2021). Estas soluciones

permiten garantizar la reducción del riesgo biológico, la disminución del volumen de residuos y la estabilización de corrientes peligrosas.

Adicionalmente, la tecnología modular presenta ventajas asociadas a menor requerimiento de espacio, escalabilidad operativa y adaptación a condiciones logísticas complejas, características relevantes en el contexto territorial de Mitú.

### ***Factibilidad logística***

Las condiciones logísticas del municipio de Mitú representan uno de los factores críticos del análisis. La limitada conectividad terrestre y la dependencia del transporte aéreo introducen vulnerabilidades operativas en el modelo actual.

La alternativa local reduce la exposición a interrupciones logísticas, variaciones tarifarias, restricciones de carga aérea y tiempos de evacuación. Estudios sobre gestión ambiental en territorios aislados destacan que la descentralización del tratamiento de residuos incrementa la resiliencia operativa y mejora la sostenibilidad del sistema (OMS, 2018).

### ***Factibilidad económica***

Desde la dimensión financiera, el modelo actual basado en transporte aéreo presenta costos recurrentes estimados entre \$240.000.000 y \$420.000.000 COP/año, valores consistentes con los rangos reportados para la evacuación de residuos peligrosos en territorios de difícil acceso (IDEAM, 2022).

La alternativa local implica una inversión inicial significativa; sin embargo, los costos operativos anuales proyectados para una planta modular híbrida se estiman en aproximadamente \$220.000.000 COP/año (PNUMA, 2021), lo que permite estabilizar la estructura de gastos en el tiempo.

Diversos estudios de factibilidad ambiental señalan que, en infraestructuras públicas ambientales, los periodos de retorno extendidos resultan técnicamente aceptables debido a los beneficios indirectos asociados, incluyendo reducción de riesgos sanitarios, mitigación de pasivos ambientales y fortalecimiento institucional (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2005).

### ***Factibilidad ambiental***

Desde la perspectiva ambiental, la alternativa local presenta ventajas significativas. La reducción de los tiempos de almacenamiento temporal disminuye los riesgos asociados a la proliferación de agentes biológicos y la potencial liberación de contaminantes (OMS, 2018). Asimismo, la eliminación de etapas prolongadas de transporte reduce la probabilidad de incidentes logísticos, pérdidas de trazabilidad y exposición ambiental. La literatura técnica resalta que el tratamiento local de residuos peligrosos fortalece los mecanismos de control territorial y mejora la eficiencia ambiental del sistema (PNUMA, 2021).

En ecosistemas amazónicos, caracterizados por alta fragilidad ecológica, la implementación de sistemas controlados de tratamiento resulta particularmente relevante para la prevención de impactos sobre suelos y cuerpos hídricos (PNUMA, 2021).

### ***Factibilidad institucional***

Desde la dimensión institucional, la implementación de una planta municipal de RESPEL fortalece la autonomía ambiental del territorio y mejora la articulación entre los actores involucrados en la gestión de residuos.

La literatura sobre gobernanza ambiental señala que la disponibilidad de infraestructura local promueve la consolidación de capacidades técnicas, mejora la trazabilidad y optimiza la planificación territorial (Rodríguez & Espinoza, 2018).

Adicionalmente, la alternativa local permite integrar de manera más efectiva la gestión hospitalaria con la gestión ambiental municipal, reduciendo la fragmentación del sistema.

### ***Riesgos y consideraciones operativas***

El análisis integral de factibilidad exige reconocer que la implementación de una infraestructura de tratamiento térmico en el Vaupés presenta riesgos operativos inherentes que deben ser mitigados de manera estratégica.

En el componente técnico, el riesgo de interrupción energética resulta crítico; dado que los procesos térmicos requieren temperaturas altas y sostenidas para evitar la emisión de compuestos altamente tóxicos (como dioxinas y furanos), el diseño de la planta exige la integración innegociable de sistemas autónomos de respaldo eléctrico que garanticen la continuidad de la operación (OMS, 2018).

A nivel logístico, se identifica un riesgo de obsolescencia por mantenimiento, el cual está asociado a la dificultad de acceder a repuestos y personal especializado en el territorio. Esta vulnerabilidad debe mitigarse desde la fase de planificación mediante la estructuración de contratos de adquisición u operación que incluyan transferencia tecnológica y capacitación permanente de la mano de obra local (PNUMA, 2021).

Finalmente, en el escenario institucional y normativo, la ejecución del proyecto está supeditada al cumplimiento de estrictos requerimientos legales. Para su construcción y puesta en marcha, la planta requerirá la obtención previa de una Licencia Ambiental expedida por la Corporación CDA, de conformidad con los lineamientos del Decreto 1076 de 2015. Asimismo, la administración municipal como operadora deberá garantizar que los sistemas de filtración se mantengan permanentemente bajo los umbrales de emisión atmosférica dictados por la Resolución 2254 de 2017, y que el encapsulamiento de las cenizas residuales respete los

parámetros de disposición final y confinamiento establecidos en el Decreto 4741 de 2005 (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2005).

### ***Síntesis del análisis de factibilidad***

El análisis integral evidencia que la implementación de una planta modular híbrida para el tratamiento de RESPEL en Mitú resulta viable desde una perspectiva técnica, económica, ambiental, logística e institucional.

La alternativa local no solo reduce la dependencia estructural del transporte aéreo, sino que fortalece la autonomía territorial, optimiza los costos operativos y mejora la sostenibilidad ambiental del municipio.

Este resultado sustenta la formulación de la propuesta técnica desarrollada en la siguiente sección.

### **Propuesta técnica: Planta local de disposición y tratamiento de residuos peligrosos (RESPEL)**

El análisis diagnóstico, normativo y de factibilidad desarrollado en la presente investigación permite sustentar la necesidad de implementar una solución técnica local para el tratamiento y disposición final de residuos peligrosos (RESPEL) en el municipio de Mitú. En este contexto, se propone la formulación de una planta modular híbrida de carácter municipal, diseñada bajo criterios de sostenibilidad ambiental, viabilidad operativa y fortalecimiento de la gestión pública territorial.

La propuesta responde a las limitaciones estructurales identificadas en el modelo actual, particularmente la dependencia del transporte aéreo, los costos logísticos elevados y los riesgos ambientales asociados al almacenamiento prolongado de residuos peligrosos (IDEAM, 2022; OMS, 2018).

### ***Escenarios y Fases de Implementación***

Para garantizar el éxito de la planta modular y mitigar el riesgo de sobrecarga administrativa en el municipio, se plantea un escenario de implementación gradual estructurado en dos fases estratégicas (PNUMA, 2021):

Fase 1 (Corto Plazo) - Escenario Institucional: Durante el primer año de operación, la planta atenderá exclusivamente los flujos de RESPEL generados por la E.S.E. Hospital San Antonio y los centros de salud aledaños. Al ser generadores formales que ya cuentan con presupuesto asignado para disposición final, este escenario garantiza el punto de equilibrio financiero inicial de la planta sin depender del comportamiento de los ciudadanos.

Fase 2 (Mediano Plazo) - Escenario Comercial Urbano: A partir del segundo año, una vez estabilizada la curva de aprendizaje técnico de los operadores, el municipio implementará el escenario de corresponsabilidad coercitiva, obligando a los talleres mecánicos y establecimientos comerciales a entregar sus residuos (aceites, filtros, químicos) como requisito para la renovación de sus permisos de operación (Rodríguez & Espinoza, 2018).

### ***Enfoque conceptual de la propuesta***

La planta propuesta se fundamenta en un modelo de tratamiento modular híbrido, el cual combina tecnologías de tratamiento térmico controlado con sistemas de encapsulamiento seguro para residuos residuales. Este enfoque ha sido ampliamente recomendado para territorios con generación media de RESPEL, especialmente en regiones aisladas o con restricciones logísticas (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [PNUMA], 2021).

Desde la perspectiva ambiental, el tratamiento térmico permite la reducción del riesgo biológico y la disminución significativa del volumen de residuos, mientras que el

encapsulamiento garantiza la estabilización de materiales residuales bajo condiciones controladas (OMS, 2018).

### ***Justificación técnica del modelo modular***

La generación estimada de residuos peligrosos en Mitú, situada en un rango aproximado entre 20 y 35 toneladas/año, resulta compatible con soluciones modulares de escala intermedia. La literatura técnica señala que este tipo de plantas ofrece ventajas asociadas a menor requerimiento de infraestructura, escalabilidad operativa y adaptación a contextos territoriales complejos (PNUMA, 2021).

Adicionalmente, la tecnología modular reduce los requerimientos de inversión frente a plantas industriales de gran escala y permite ajustes progresivos en función del crecimiento de la demanda.

### ***Componentes técnicos de la planta***

La planta modular híbrida contempla los siguientes subsistemas operativos: El sistema de recepción y almacenamiento controlado permitirá la consolidación segura de residuos provenientes de generadores institucionales y municipales. Este componente deberá cumplir con los lineamientos establecidos en la Resolución 1164 de 2002, particularmente en lo relacionado con segregación, rotulado y condiciones de almacenamiento (Ministerio de Salud, 2002).

El sistema de tratamiento térmico controlado constituirá el núcleo tecnológico de la planta, permitiendo la desactivación de residuos biosanitarios, infecciosos y farmacéuticos. La Organización Mundial de la Salud reconoce este tipo de tecnología como una de las alternativas más eficientes para la reducción del riesgo sanitario (OMS, 2018).

El sistema de encapsulamiento seguro garantizará la disposición final de residuos residuales estabilizados, conforme a criterios de confinamiento ambientalmente seguro (PNUMA, 2021).

Finalmente, el sistema de control ambiental incorporará mecanismos de monitoreo de emisiones, manejo de cenizas y control de variables operativas, asegurando el cumplimiento normativo.

La planta modular híbrida propuesta contempla un requerimiento estimado de área entre 500 y 800 m<sup>2</sup>, incluyendo zona de recepción, almacenamiento temporal, unidad de tratamiento térmico, área de encapsulamiento y zona administrativa. El sistema incorpora un módulo de incineración de baja capacidad, complementado con encapsulamiento seguro de residuos residuales. Se prevé un sistema básico de control de emisiones mediante cámara secundaria y filtración, en cumplimiento de lineamientos ambientales aplicables, minimizando impactos atmosféricos y riesgos para la salud.

Este enfoque resulta consistente con los lineamientos técnicos aplicables al tratamiento térmico de residuos peligrosos en instalaciones de baja capacidad, donde el control de emisiones constituye un criterio central de desempeño ambiental.

### ***Modelo de gestión pública propuesto***

Desde la perspectiva institucional, la planta se concibe bajo un esquema de gestión municipal pública, en el cual la administración territorial asume la coordinación del sistema, en articulación con la autoridad ambiental regional.

La literatura sobre gobernanza ambiental señala que la disponibilidad de infraestructura local fortalece la autonomía territorial, optimiza la planificación ambiental y mejora la eficiencia de los sistemas públicos de gestión (Rodríguez & Espinoza, 2018).

Este modelo permite integrar la gestión hospitalaria con la gestión ambiental municipal, reduciendo la fragmentación operativa actualmente existente.

### ***Integración con la política ambiental municipal***

La propuesta técnica se articula con los principios de la gestión ambiental territorial y la planificación sostenible. Su implementación permitiría fortalecer los instrumentos locales de política pública, particularmente en lo relacionado con gestión integral de residuos, salud ambiental y prevención de impactos ecológicos.

El Decreto 4741 de 2005 establece la necesidad de promover sistemas integrales de manejo de RESPEL, destacando la importancia de fortalecer capacidades institucionales y mecanismos de control (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2005).

En este sentido, la planta municipal contribuiría al cumplimiento efectivo de los lineamientos normativos y a la consolidación de una política ambiental local más robusta.

### ***Beneficios estratégicos del modelo propuesto***

Desde la dimensión ambiental, la planta permitiría reducir riesgos sanitarios, minimizar impactos asociados al almacenamiento prolongado y fortalecer el control territorial de los flujos de residuos peligrosos (OMS, 2018).

Desde la perspectiva económica, la alternativa local contribuiría a estabilizar los costos operativos del sistema, reducir la dependencia logística externa y optimizar la asignación de recursos públicos (IDEAM, 2022).

En el ámbito social, la implementación de la planta generaría oportunidades de empleo local especializado, fortalecimiento de capacidades técnicas y consolidación de prácticas sostenibles.

Finalmente, desde la dimensión institucional, la propuesta promueve la autonomía ambiental del municipio, la articulación interinstitucional y la sostenibilidad del sistema de gestión de residuos.

### ***Viabilidad territorial de la propuesta***

El modelo modular híbrido resulta coherente con las condiciones territoriales del municipio de Mitú. Su escala intermedia, requerimientos de infraestructura controlados y adaptabilidad operativa lo convierten en una alternativa viable para contextos amazónicos.

La literatura especializada destaca que este tipo de soluciones representa una estrategia eficiente para territorios con restricciones logísticas y generación moderada de residuos peligrosos (PNUMA, 2021).

### **Lineamientos institucionales y estrategias de fortalecimiento de la gestión pública ambiental**

En coherencia con el objetivo específico orientado a la formulación de lineamientos institucionales y estratégicos, se presentan a continuación las directrices orientadas al fortalecimiento de la gestión pública ambiental del municipio en materia de residuos peligrosos.

La implementación de una planta local para el tratamiento y disposición final de residuos peligrosos (RESPEL) en el municipio de Mitú requiere no solo de una solución tecnológica adecuada, sino también del fortalecimiento de los instrumentos institucionales, administrativos y educativos que garanticen la sostenibilidad del sistema en el tiempo.

La literatura especializada en gestión ambiental señala que los sistemas de manejo de residuos peligrosos dependen en gran medida de la articulación interinstitucional, la claridad de roles administrativos y la consolidación de estrategias de educación ambiental (PNUMA, 2021).

### ***Fortalecimiento de la gestión institucional***

Frente a la evaluación de la capacidad institucional local para operar una infraestructura de esta naturaleza, el diagnóstico reconoce que la administración municipal de Mitú actualmente carece del músculo técnico especializado para asumir la operación directa e inmediata de la planta. Por tanto, el modelo de gestión pública propuesto no sugiere una operación municipal aislada, sino un esquema de operación tercerizada transitoria o Alianza Público-Privada (APP) de baja escala.

Bajo este modelo, la Alcaldía asume la titularidad de la infraestructura y el control tarifario, pero concesiona la operación técnica a un gestor especializado durante los primeros cinco años. Este contrato debe incluir una cláusula obligatoria de transferencia tecnológica, donde el gestor capacite progresivamente a una nueva Unidad de Gestión Ambiental conformada por técnicos locales. De esta manera, se solventa la brecha de capacidad técnica inmediata y se asegura que, a mediano plazo, el municipio logre una verdadera autonomía institucional en el manejo de sus RESPEL (Aguilar Villanueva, 2006; Massoud et al., 2003).

### ***Articulación interinstitucional***

La gestión de residuos peligrosos representa una problemática transversal que involucra múltiples actores institucionales. La literatura sobre gobernanza ambiental destaca que la coordinación entre entidades territoriales, autoridades ambientales y generadores resulta determinante para la sostenibilidad de los sistemas de gestión (Rodríguez & Espinoza, 2018).

En el contexto de Mitú, la articulación interinstitucional deberá orientarse a:

La integración de la gestión hospitalaria con la planificación ambiental municipal, permitiendo optimizar rutas operativas, consolidar flujos de residuos y fortalecer la trazabilidad.

El establecimiento de mecanismos de cooperación técnica con la autoridad ambiental regional, garantizando el cumplimiento normativo y la vigilancia ambiental del sistema.

La incorporación de la problemática de RESPEL dentro de los instrumentos de planificación territorial y ambiental.

### ***Educación ambiental y corresponsabilidad***

Desde la perspectiva social, la sostenibilidad del sistema depende de la construcción de una cultura ambiental orientada al manejo adecuado de residuos peligrosos. Diversos estudios han señalado que la educación ambiental constituye un componente esencial en la reducción de riesgos sanitarios y ambientales (PNUMA, 2021).

La Organización Mundial de la Salud resalta que la segregación en la fuente y el manejo adecuado de residuos hospitalarios dependen en gran medida de la capacitación del personal y la sensibilización institucional (OMS, 2018).

En este sentido, se propone la implementación de estrategias de educación ambiental dirigidas a:

Personal de salud y funcionarios institucionales vinculados al manejo de RESPEL.  
Generadores no hospitalarios, incluyendo talleres, establecimientos comerciales y actividades económicas urbanas.

Comunidad en general, particularmente en lo relacionado con medicamentos vencidos, productos químicos domésticos y envases contaminados.

### ***Mecanismos de seguimiento y control***

La sostenibilidad del modelo propuesto requiere la implementación de instrumentos de monitoreo, evaluación y control. La literatura especializada señala que los sistemas de gestión de

residuos peligrosos deben incorporar indicadores de desempeño ambiental, trazabilidad y eficiencia operativa (IDEAM, 2022).

En este contexto, la administración municipal deberá consolidar mecanismos de registro, control de flujos, supervisión operativa y evaluación periódica del sistema.

La articulación con el Registro de Generadores de RESPEL administrado por el IDEAM permitirá fortalecer la trazabilidad y el control institucional (IDEAM, 2022).

### ***Impacto institucional y territorial esperado***

La adopción de los lineamientos institucionales y educativos propuestos permitirá fortalecer la autonomía ambiental del municipio, optimizar la gestión pública y consolidar un modelo de gobernanza ambiental más eficiente.

Diversos estudios han señalado que la descentralización del tratamiento de residuos peligrosos contribuye al fortalecimiento institucional, la sostenibilidad financiera y la resiliencia territorial (PNUMA, 2021).

## Conclusiones

En respuesta a los objetivos orientados a analizar el contexto territorial y examinar el marco normativo, se concluye que la disfuncionalidad en la gestión de RESPEL en Mitú no deriva de vacíos legales, sino de una brecha crítica de infraestructura. El cumplimiento estricto del Decreto 4741 de 2005 resulta material y financieramente insostenible en territorios amazónicos dependientes del flete aéreo, lo que hace imperativa la descentralización del tratamiento para garantizar la autonomía ambiental (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2005).

Frente al objetivo de caracterizar las fuentes generadoras, se determinó que la producción de RESPEL (estimada entre 20 y 35 ton/año) está altamente concentrada en el sector salud (E.S.E. Hospital San Antonio). Este volumen continuo, pero moderado, valida la idoneidad técnica de implementar tecnologías modulares de escala intermedia, demostrando que el municipio no requiere macroproyectos industriales, sino soluciones híbridas ajustadas a su dinámica poblacional (OMS, 2018).

Para dar cumplimiento al objetivo de evaluar comparativamente las alternativas de disposición final, se probó analíticamente mediante la herramienta multicriterio que la implementación de una planta local (con un desempeño óptimo de 3,90) supera con creces al modelo de transporte externo (1,50). La alternativa local demostró ser la única opción capaz de interiorizar las externalidades ambientales, garantizar la continuidad operativa y devolver al territorio su gobernanza sobre el riesgo sanitario (Belton & Stewart, 2002).

En cuanto al objetivo de analizar la factibilidad integral (técnica, ambiental y económica), se concluye que la barrera de inversión inicial del proyecto se justifica por su estabilización financiera estructural. Al suprimir la variable inflacionaria e inestable del transporte aéreo, la

planta municipal alcanza un punto de equilibrio hacia el séptimo año, transformando un gasto logístico perpetuo en una inversión en salud pública y prevención ecosistémica (PNUMA, 2021).

Finalmente, respecto al diseño de la propuesta técnica y la formulación de lineamientos institucionales, se concluye que la viabilidad del modelo modular depende de un esquema estricto de gestión pública municipal. La sostenibilidad del sistema exige estrategias coercitivas de corresponsabilidad que transformen la entrega adecuada de residuos en un requisito ineludible para la operación comercial, integrando la gestión ambiental a los instrumentos de planificación y control del territorio (Rodríguez & Espinoza, 2018).

## Recomendaciones

Con base en los hallazgos analíticos y la evaluación integral de factibilidad, se formulan las siguientes recomendaciones orientadas a la administración municipal de Mitú y a las autoridades ambientales competentes:

**Transición a fase de prefactibilidad técnica:** Dado que la evaluación multicriterio demostró la superioridad estructural de la planta local frente al modelo de flete aéreo, se recomienda a la Alcaldía de Mitú utilizar esta investigación como insumo base para estructurar los estudios de ingeniería de detalle del proyecto modular. Esta infraestructura debe ser priorizada en los instrumentos de planificación territorial y en el Plan de Desarrollo Municipal.

**Gestión del riesgo y licenciamiento temprano:** Se sugiere iniciar de manera anticipada mesas de trabajo con la Corporación CDA para delinear la hoja de ruta del proceso de Licenciamiento Ambiental exigido por el Decreto 1076 de 2015. Asimismo, en la estructuración de la licitación o compra de la planta, es imperativo exigir contractualmente la inclusión de sistemas de respaldo energético (plantas eléctricas) y pólizas de mantenimiento con transferencia tecnológica, mitigando así los riesgos operativos por aislamiento geográfico (PNUMA, 2021).

**Implementación de corresponsabilidad coercitiva:** Para garantizar el punto de equilibrio financiero de la planta y modificar las prácticas de disposición informal de los talleres mecánicos, se recomienda al Concejo Municipal expedir un acuerdo que condicione la entrega y renovación de los permisos de funcionamiento comercial a la presentación mensual del certificado de disposición de RESPEL en la planta local (Rodríguez & Espinoza, 2018).

**Mesa técnica interinstitucional:** Se aconseja consolidar un comité operativo permanente entre la Alcaldía, la E.S.E. Hospital San Antonio y la CDA. El objetivo de esta articulación debe ser unificar los protocolos logísticos de recolección y asegurar que el volumen base de residuos

hospitalarios sostenga económicamente el inicio de las operaciones del sistema modular (OMS, 2018).

Estudios de caracterización directa: Para futuras fases del proyecto, se recomienda ejecutar caracterizaciones cuantitativas directas (pesajes in situ durante al menos tres meses) en el sector comercial urbano y en los centros de salud. Esto permitirá afinar la estimación referencial de 20 a 35 ton/año y dimensionar con exactitud milimétrica la capacidad requerida para la cámara de combustión y el sistema de control de emisiones de la planta (IDEAM, 2022).

### Referencias Bibliográficas

- Abarca Guerrero, L., Maas, G., & Hogland, W. (2013). Solid waste management challenges for cities in developing countries. *Waste Management*, 33(1), 220–232.
- Aguilar Villanueva, L. F. (2006). *Gobernanza y gestión pública*. Fondo de Cultura Económica.
- Alcaldía de Mitú. (2020). *Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) del municipio de Mitú*.
- Banco Mundial. (2018). *What a waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050*. World Bank.
- Bardin, L. (2013). *Análisis de contenido*. Ediciones Akal.
- Belton, V., & Stewart, T. (2002). *Multiple criteria decision analysis: An integrated approach*. Kluwer Academic Publishers.
- Congreso de Colombia. (1993). *Ley 99 de 1993 por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente y se organiza el Sistema Nacional Ambiental (SINA)*.
- Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES). (2008). *Documento CONPES 3510: Política nacional para la gestión integral de residuos peligrosos*. Departamento Nacional de Planeación.
- Corporación para el Desarrollo Sostenible del Norte y Oriente Amazónico (CDA). (2021). *Resolución DSV-039-21 de 2021*.
- Creswell, J. W., & Plano Clark, V. L. (2018). *Designing and conducting mixed methods research* (3.<sup>a</sup> ed.). SAGE Publications.
- Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2016). *Política para la gestión integral de residuos sólidos en Colombia*.

European Environment Agency. (2020). Waste management in Europe: Principles and practices. Publications Office of the European Union.

Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista-Lucio, M. (2022). Metodología de la investigación (7.<sup>a</sup> ed.). McGraw-Hill.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2019). Informe sobre el estado del ambiente y los recursos naturales renovables en Colombia.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2022). Informe nacional de generación y manejo de residuos peligrosos en Colombia.

Kerlinger, F. N., & Lee, H. B. (2002). Investigación del comportamiento: Métodos de investigación en ciencias sociales (4.<sup>a</sup> ed.). McGraw-Hill.

Kumar, S., Smith, S. R., Fowler, G., Velis, C., Kumar, S. J., Arya, S., Rena, & Cheeseman, C. (2017). Challenges and opportunities associated with waste management in India. *Royal Society Open Science*, 4(3).

LaGrega, M. D., Buckingham, P. L., & Evans, J. C. (2010). Hazardous waste management (2.<sup>a</sup> ed.). Waveland Press.

Massoud, M. A., El-Fadel, M., & Abdel Malak, A. (2003). Assessment of public vs private MSW management: A case study. *Waste Management*, 23(7), 621–630.

Mendoza, G. A., & Martins, H. (2006). Multi-criteria decision analysis in natural resource management: A critical review. *Forest Ecology and Management*, 230(1–3), 1–22.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Decreto 1076 de 2015 por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). Resolución 2254 de 2017 por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2005). Decreto 4741 de 2005 por el cual se reglamenta la prevención y manejo de los residuos o desechos peligrosos.

Ministerio de Salud. (2002). Resolución 1164 de 2002: Manual de procedimientos para la gestión integral de residuos hospitalarios y similares.

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2018). Safe management of wastes from health-care activities (2.<sup>a</sup> ed.).

Ostrom, E. (1990). *Governing the commons: The evolution of institutions for collective action*. Cambridge University Press.

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (2019). *Global Environment Outlook – GEO-6: Healthy planet, healthy people*.

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (2021). *Waste management outlook for Latin America and the Caribbean*.

Rodríguez, M., & Espinoza, G. (2018). *Gestión ambiental en América Latina y el Caribe*. Banco Interamericano de Desarrollo.

Tchobanoglous, G., & Kreith, F. (2002). *Handbook of solid waste management* (2.<sup>a</sup> ed.). McGraw-Hill.

United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development*.

Wilson, D. C., Velis, C., & Cheeseman, C. (2006). Role of informal sector recycling in waste management. *Habitat International*, 30(4), 797–808.

World Commission on Environment and Development (WCED). (1987). *Our common future*. Oxford University Press.

Yin, R. K. (2018). Case study research and applications: Design and methods (6.<sup>a</sup> ed.). SAGE Publications.

Ziraba, A. K., Haregu, T. N., & Mberu, B. (2016). A review of the impact of poor waste management on health. *Archives of Public Health*, 74(55).