

ARTÍCULO ACADÉMICO • INVESTIGACIÓN ORIGINAL • ESTUDIO DE CASO

DOI: <https://doi.org/10.67827/mycnhm82>

Propuesta de estrategia para mitigar impactos ambientales negativos de residuos sólidos orgánicos en un frigorífico porcino del Paraguay central

Proposed strategy for mitigating negative environmental impacts of organic solid waste in a pork slaughterhouse in central Paraguay

Colturi Campos, Fabio Alberto •  fabiocolturi@gmail.com

Candia Domínguez, Gladys Griselda •  gladys250@gmail.com

Meza Quiñónez, María Patricia •  mpatimezaq23.5@gmail.com

Fariña Cardozo, Rosalía Beatriz •  rosaliafarina2015@gmail.com

*Programa académico: Maestría en Política, Gestión y Legislación Ambiental
Instituto Superior Vía Pro Desarrollo, Asunción, Paraguay*

Recibido: 22/04/2026

Aceptado: 25/04/2026

Publicado: 04/05/2026

Cómo citar este artículo

Colturi Campos, F. A., Candia Domínguez, G. G., Meza Quiñónez, M. P., & Fariña Cardozo, R. B. (2026). Propuesta de estrategia para mitigar impactos ambientales negativos de residuos sólidos orgánicos en un frigorífico porcino del Paraguay central. *Revista Científica VIACONCIENCIA*, 1(1). 130 – 153
DOI: <https://doi.org/10.67827/mycnhm82>



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial 4.0 Internacional.

© 2026 Instituto Superior Vía Pro Desarrollo. Todos los derechos reservados.

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo determinar una propuesta de estrategia para mitigar los impactos ambientales negativos derivados de los residuos sólidos orgánicos (RSO) generados en un frigorífico porcino de la zona central del Paraguay durante el año 2024. Se aplicó un enfoque cualitativo descriptivo-exploratorio, configurado metodológicamente como estudio de caso único (Yin, 2018; Stake, 2007). La recolección de datos combinó entrevistas semiestructuradas a ocho informantes clave, observación documental in situ y análisis documental, con tratamiento de la información mediante triangulación metodológica y codificación temática. Los resultados permitieron identificar diez categorías de RSO — incluyendo sangre, vísceras, grasas, pelos, pezuñas, cuero, restos cárnicos, envases, residuos de

comedor y aceites de purga, así como cenizas de caldera—, con una generación promedio aproximada de 3.000 kg/día en condiciones operativas habituales. Se constató la ausencia de tecnologías de tratamiento in situ, el incumplimiento parcial de la Ley N.º 3956/09 y la falta de capacitación sistemática del personal. La biodigestión anaeróbica y el compostaje mecanizado fueron evaluadas como tecnologías técnica y económicamente viables. La hipótesis se confirmó: la gestión vigente no constituye una estrategia integral. Se propone un modelo de siete ejes basado en reducción en fuente, valorización de subproductos, tecnologías limpias, fortalecimiento normativo y educación ambiental, sustentado en los principios de la economía circular y replicable en establecimientos similares.

Palabras clave: *residuos sólidos orgánicos; gestión ambiental; industria frigorífica; mitigación de impacto ambiental; economía circular; estudio de caso.*

ABSTRACT

This study aimed to determine a proposed strategy for mitigating negative environmental impacts derived from organic solid waste (OSW) generated at a pork slaughterhouse in central Paraguay during 2024. A descriptive-exploratory qualitative approach was applied, methodologically configured as a single case study (Yin, 2018; Stake, 2007). Data collection combined semi-structured interviews with eight key informants, in situ documentary observation, and document analysis, with information processed through methodological triangulation and thematic coding. The results identified ten categories of OSW—including blood, viscera, fats, hair, hooves, leather, meat scraps, packaging, dining-area waste, and purge oils, as well as boiler ash—with an estimated average generation of approximately 3,000 kg/day under usual operating conditions. The absence of on-site treatment technologies, partial non-compliance with Law No. 3956/09, and the lack of systematic staff training were confirmed. Anaerobic biodigestion and mechanized composting were evaluated as technically and economically viable technologies. The hypothesis was confirmed: current management does not constitute an integral strategy. A seven-axis model is proposed, based on source reduction, byproduct valorization, clean technologies, regulatory strengthening, and environmental education, grounded in circular-economy principles and replicable in similar establishments.

Keywords: *organic solid waste; environmental management; meat processing industry; environmental mitigation; circular economy; case study.*

1. Introducción

La gestión inadecuada de los residuos sólidos orgánicos (RSO) constituye uno de los desafíos ambientales más apremiantes en la industria agroalimentaria a escala global. Los establecimientos de faena y procesamiento cárnico —denominados frigoríficos— generan volúmenes considerables de residuos derivados de los procesos de sacrificio, desposte, cocción y almacenamiento, cuya composición orgánica —sangre, vísceras, grasas, pelos, cuero y subproductos del ciclo productivo— los hace especialmente susceptibles a la descomposición anaeróbica, con la consecuente emisión de gases de efecto invernadero (GEI), contaminación hídrica y degradación del suelo (Aguilar Arguedas, 2020). Según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2021), los residuos orgánicos industriales representan una fuente significativa de metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O) a nivel mundial, contribuyendo al calentamiento global cuando su manejo no sigue criterios de sostenibilidad. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2021) estima que más del 30 % de los alimentos producidos globalmente se pierde o desperdicia, generando una carga ambiental asociada de residuos orgánicos que demanda respuestas tecnológicas e institucionales urgentes.

En Paraguay, la industria cárnica constituye un pilar económico estratégico: el país se posiciona entre los diez principales exportadores mundiales de carne bovina y porcina, con una contribución sostenida al producto interno bruto (PIB) y a la generación de empleo en regiones rurales (MAG, 2023). Sin embargo, este dinamismo productivo coexiste con serias debilidades en la gestión ambiental del sector, especialmente en establecimientos de mediana escala ubicados en municipios con infraestructura institucional limitada. Rodas Torres (2018) documentó que la mayoría de los frigoríficos bovinos paraguayos opera bajo esquemas mínimos de cumplimiento normativo, sin sistemas integrales de tratamiento de residuos. Esta realidad se agrava por la insuficiente aplicación de la Ley N.º 3956/09 de Gestión Integral de Residuos Sólidos —que establece los principios de reducción, reutilización y reciclaje como jerarquía de intervención— en contextos rurales y semiurbanos donde la fiscalización ambiental presenta limitaciones estructurales (FAO, 2020).

El caso analizado en el presente estudio corresponde a un frigorífico porcino de la zona central del Paraguay; en cumplimiento de los acuerdos de confidencialidad con la empresa participante, se omiten su denominación comercial y ubicación específica, y se utiliza la designación genérica «el frigorífico bajo estudio» a lo largo del trabajo. Se trata de un establecimiento de

mediana escala que ejecuta los ciclos de faena y desposte de ganado porcino, opera con la Declaración de Impacto Ambiental (DIA) requerida por el Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADES) y cuenta con la habilitación correspondiente del Servicio Nacional de Calidad y Salud Animal (SENACSA). Su Área de Influencia Directa (AID) incluye viviendas de trabajadores y de pobladores rurales próximas al perímetro industrial, así como cursos y reservorios de agua estacionales utilizados por la comunidad. Esta configuración social y ambiental amplifica el riesgo derivado de una gestión deficiente de los RSO, dado que la contaminación del suelo y del agua afecta directamente la calidad de vida de la comunidad circundante y puede generar pasivos ambientales de difícil reversión.

Los marcos teóricos y normativos internacionales vigentes ofrecen orientaciones coherentes para abordar esta problemática. El Acuerdo de París (2015) y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 12 y ODS 13) establecen compromisos globales de reducción de emisiones y de producción y consumo responsables que afectan directamente al sector cárnico paraguayo. La norma ISO 14001:2015 provee un marco de gestión ambiental sistemático, mientras que los principios de economía circular —que proponen transformar los residuos en recursos productivos dentro de ciclos cerrados de valor— ofrecen un modelo conceptual aplicable a la realidad paraguaya (Geissdoerfer et al., 2017; Nayak & Bhushan, 2019). Tecnologías como la biodigestión anaeróbica y el compostaje mecanizado han demostrado ser técnica y económicamente viables en contextos agroindustriales similares de América Latina, con beneficios cuantificables en reducción de emisiones, valorización de subproductos y mejora del desempeño ambiental empresarial (Paredes et al., 2022).

A partir del análisis del contexto expuesto, la presente investigación plantea tres preguntas articuladas: ¿Cuáles son los tipos, volúmenes e impactos ambientales de los RSO generados en el frigorífico bajo estudio? ¿Qué tecnologías y prácticas de gestión son técnica y económicamente viables en ese contexto local? ¿Qué propuesta integral de mitigación puede formularse para reducir, de manera sostenible, los impactos ambientales negativos de dichos residuos? El objetivo general fue determinar una propuesta de estrategia para mitigar los impactos ambientales negativos de los RSO generados en el frigorífico bajo estudio durante el año 2024. Los objetivos específicos fueron: (1) identificar los tipos y volúmenes de RSO y sus impactos ambientales negativos sobre el medio receptor; (2) evaluar tecnologías y prácticas de gestión aplicables al contexto local, considerando efectividad y costos de implementación; y (3) elaborar una propuesta de gestión integral basada en la reducción, el reciclaje y la reutilización de subproductos, que asegure viabilidad técnica y sostenibilidad a largo plazo.

La hipótesis central sostiene que las acciones implementadas por el establecimiento no constituyen una estrategia de mitigación integral, dado que apuntan al mero cumplimiento documental sin visión articulada de sostenibilidad social, económica y ambiental. Los hallazgos presentados en este artículo confirman dicha hipótesis y ofrecen una base técnica y conceptual para el diseño de una propuesta sistemática replicable en establecimientos similares del Paraguay, con potencial para orientar la formulación de políticas públicas sectoriales más específicas y efectivas en materia de gestión ambiental industrial.

2. Marco Teórico

2.1. Los frigoríficos y la generación de residuos sólidos orgánicos

Se entiende por establecimiento frigorífico aquella instalación industrial dedicada al sacrificio, procesamiento y conservación de productos cárnicos mediante cadena de frío. La cadena productiva de un frigorífico porcino comprende la recepción y control sanitario de animales en corrales, el noqueo, desangrado, escaldado, pelado y flameado, el desposte y los cortes específicos del ciclo II, el empaque y el despacho del producto final. En cada etapa se generan distintas fracciones de RSO con características fisicoquímicas diferenciadas: la sangre presenta alta concentración de proteínas, hemoglobina y nitrógeno orgánico, con una demanda biológica de oxígeno (DBO) que puede superar los 150.000 mg/L; las vísceras y grasas poseen alto contenido calórico y son susceptibles a la rancificación; el cuero presenta elevada carga de cloruros cuando se aplica salado, y los pelos y pezuñas, de elevado contenido en queratina, son de lenta biodegradación natural. Estos residuos, junto con cenizas de caldera y aceites de purga de sala de máquinas, configuran un flujo heterogéneo cuya gestión integrada es condición de un manejo ambientalmente coherente.

La relevancia económica del sector cárnico en América Latina impone la búsqueda de modelos de gestión ambiental que concilien competitividad productiva con responsabilidad ecológica. Bermúdez et al. (2022) señalan que la adopción de sistemas de gestión ambiental en empresas agroalimentarias latinoamericanas no solo reduce los pasivos ambientales, sino que mejora la imagen corporativa, facilita el acceso a mercados internacionales con crecientes exigencias de sostenibilidad y reduce los costos operativos a mediano plazo. En Paraguay, el sector frigorífico porcino tiene presencia relevante en departamentos del centro del país, donde establecimientos de mediana escala constituyen fuentes de empleo directo e indirecto para comunidades rurales con alternativas económicas limitadas.

2.2. Gestión Integral de Residuos Sólidos (GIRS) y jerarquía de gestión

La Gestión Integral de Residuos Sólidos (GIRS) es un enfoque sistémico que integra la planificación, organización, control y monitoreo de todas las etapas del ciclo de vida de los residuos, desde su generación hasta la disposición final. Su jerarquía de intervención establece, en orden de prioridad decreciente, la reducción en la fuente, la reutilización, el reciclaje, la valorización energética y la disposición final controlada (Hoornweg & Bhada-Tata, 2012; Leiton Rodríguez & Revelo Maya, 2017). Este enfoque es coherente con los requisitos de la norma ISO 14001:2015, que exige a las organizaciones identificar sus aspectos e impactos ambientales significativos (cláusula 6.1.2), establecer objetivos de mejora continua con indicadores medibles (cláusula 6.2) y realizar seguimiento, medición, análisis y evaluación del desempeño (cláusula 9.1) (ISO, 2015).

En el contexto específico de la industria cárnica, Choles Vidal (2013) demostró que la aplicación de la GIRS en pequeñas y medianas empresas alimentarias latinoamericanas requiere no solo inversión en infraestructura tecnológica, sino un cambio cultural organizacional que solo se alcanza mediante programas formativos continuos y liderazgo directivo comprometido con los principios de responsabilidad ambiental. Acero et al. (2013) documentaron que los frigoríficos colombianos enfrentan barreras estructurales similares a las de Paraguay, lo que sugiere la existencia de patrones comunes en el sector a escala regional que condicionan la capacidad de respuesta ambiental.

2.3. Impacto ambiental de los RSO de la industria cárnica

La descomposición anaeróbica de los RSO de origen cárnico genera múltiples contaminantes de alto impacto ambiental. El IPCC (2021) documenta que los residuos orgánicos industriales contribuyen entre el 3 % y el 5 % de las emisiones mundiales de GEI del sector agroindustrial, con tendencia ascendente en economías emergentes. Aguilar Arguedas (2020) cuantificó que la emisión de CH₄ por tonelada de RSO procesado en condiciones anaeróbicas no controladas puede superar los 200 m³, con un potencial de calentamiento global equivalente a 5.600 kg de CO₂ equivalente. El amoníaco (NH₃) generado por la descomposición de proteínas contribuye a la acidificación del suelo y a la eutrofización de cuerpos de agua, afectando la biodiversidad acuática y la calidad del agua para consumo humano.

En el componente hídrico, los lixiviados generados por la acumulación de RSO sin tratamiento contienen compuestos nitrogenados, fosfatados y microbiológicos que contaminan acuíferos superficiales y subterráneos. La FAO (2021) advierte que la contaminación de cuerpos de agua

por residuos orgánicos industriales en zonas rurales de América Latina representa una amenaza directa para la salud pública y la seguridad alimentaria de comunidades aledañas, particularmente en contextos con limitado acceso a agua potable de red. Jantz & Ruggerio (2021) documentaron que la acumulación de RSO sin tratamiento en suelos próximos a instalaciones industriales produce acidificación, compactación y pérdida de diversidad microbiológica, comprometiendo la capacidad productiva de las áreas agrícolas circundantes.

2.4. Tecnologías sostenibles para el tratamiento de RSO en la industria cárnica

La biodigestión anaeróbica es la tecnología más documentada y recomendada para el tratamiento de RSO húmedos de origen cárnico. El proceso convierte los residuos orgánicos en biogás —mezcla de CH₄ (55–70 %) y CO₂— utilizable como fuente de energía térmica o eléctrica, y en digestato (fertilizante orgánico líquido o sólido de alta calidad agronómica) (Nayak & Bhushan, 2019). El compostaje mecanizado, adecuado para fracciones sólidas de menor contenido hídrico, produce abono orgánico certificable con beneficios demostrables en la estructura del suelo y la retención hídrica, a costos de inversión y operación sensiblemente menores (Paredes et al., 2022).

La valorización de subproductos cárnicos —sangre para harinas proteicas, grasas para biocombustibles, huesos para gelatina y fosfatos— representa una alternativa complementaria con alto potencial económico. Geissdoerfer et al. (2017) enmarcan esta estrategia en los principios de economía circular, donde los residuos de un proceso se convierten en insumos de otro, cerrando ciclos de materiales y energía. Una revisión sistemática de Serna-Jiménez et al. (2018) sobre la valorización de subproductos cárnicos en América Latina identificó que la sangre y las vísceras porcinas poseen un potencial económico subestimado en la región, con mercados industriales receptores en los sectores de nutrición animal, biocombustibles y farmacéutica.

2.5. Marco normativo: nivel nacional, departamental y municipal

El ordenamiento jurídico paraguayo en materia de gestión de RSO industriales articula normas complementarias en distintos niveles institucionales. A nivel nacional, la Ley N.º 3956/09 de Gestión Integral de Residuos Sólidos establece los principios y obligaciones generales, incluyendo la responsabilidad extendida del productor; la Ley N.º 294/93 regula la evaluación de impacto ambiental de proyectos con potencial afectación; la Resolución MADES N.º 770/2014 fija estándares para efluentes líquidos industriales; y la Ley N.º 716/96 tipifica los delitos contra el medio ambiente. La autoridad ambiental de aplicación es el MADES, que exige

el cumplimiento del Plan de Gestión Ambiental (PGA) mediante auditorías bienales; SENACSA regula la habilitación y condiciones sanitarias de los establecimientos de faena.

A nivel departamental, los gobiernos departamentales —regulados por la Ley N.º 426/94 de Carta Orgánica del Gobierno Departamental— ejercen competencias de coordinación y articulación territorial, pero carecen de potestad reglamentaria específica sobre la gestión de RSO industriales, que la legislación reserva al ámbito municipal y al MADES. Esta configuración deja a los departamentos en un papel mayormente coordinativo, sin instrumentos técnicos de fiscalización ambiental sectorial.

A nivel municipal, la Ley Orgánica Municipal N.º 3966/10 confiere a las municipalidades competencias en materia de ordenamiento territorial, fiscalización ambiental local y gestión de residuos sólidos urbanos. En la práctica, la mayoría de las municipalidades del Paraguay central han desarrollado ordenanzas centradas en la recolección y disposición de residuos sólidos domiciliarios, pero carecen de regulaciones específicas para los RSO industriales generados por frigoríficos y otras agroindustrias. Asimismo, los planes de ordenamiento territorial municipal —cuando existen— rara vez incorporan zonificaciones diferenciadas que internalicen los impactos ambientales acumulativos de los establecimientos cárnicos en relación con asentamientos humanos y cuerpos de agua próximos.

Estas observaciones permiten identificar las siguientes deficiencias normativas relevantes para el caso de estudio: (i) ausencia de una reglamentación técnica nacional específica sobre RSO sólidos generados en frigoríficos, a diferencia de la regulación más detallada existente para efluentes líquidos; (ii) ausencia de competencias técnicas departamentales para fiscalizar el desempeño ambiental de la agroindustria; (iii) ausencia, en la mayoría de las ordenanzas municipales del área de influencia, de criterios técnicos diferenciados para la gestión de RSO industriales; y (iv) ausencia de instrumentos municipales de ordenamiento territorial que regulen la proximidad entre establecimientos cárnicos, asentamientos humanos y cuerpos de agua. Este vacío normativo multinivel facilita el incumplimiento parcial documentado en el caso analizado y demanda atención por parte de los tomadores de decisión pública (FAO, 2020).

3. Metodología

3.1. Tipo, enfoque y diseño de la investigación

La investigación fue de tipo descriptivo-exploratorio con enfoque cualitativo, configurada metodológicamente como un estudio de caso único e instrumental (Yin, 2018; Stake, 2007). El

alcance descriptivo se fundamenta en la necesidad de presentar la información tal como se manifiesta en la realidad estudiada, y el carácter exploratorio se justifica por la escasez de evidencia empírica sistematizada sobre la gestión de RSO en frigoríficos porcinos paraguayos de mediana escala. El diseño de estudio de caso es particularmente adecuado cuando se busca comprender en profundidad un fenómeno contemporáneo dentro de su contexto real, especialmente cuando los límites entre fenómeno y contexto no son evidentes (Yin, 2018). El enfoque cualitativo permite capturar la complejidad contextual del fenómeno —percepciones del personal operativo, lógicas organizacionales, restricciones logísticas e institucionales— que no son accesibles mediante aproximaciones cuantitativas (Hernández Sampieri et al., 2014; Flick, 2018; Creswell & Poth, 2018).

3.2. Unidad de análisis y contexto social del caso

Por razones de confidencialidad acordadas con la empresa participante, se utiliza la designación genérica «el frigorífico bajo estudio» a lo largo del trabajo; la identidad real de la organización es conocida por los evaluadores. La unidad de análisis fue una planta industrial paraguaya dedicada a la industrialización de carne porcina (ciclos I de faena y II de desposte), localizada en un municipio rural-semiurbano de la zona central del país.

La caracterización del entorno se realizó priorizando la descripción social del Área de Influencia Directa (AID), por considerarse más relevante para el objeto de la investigación que la descripción ecorregional general. Se delimitó un AID de 500 metros alrededor del perímetro de la planta, en la cual se identifican los siguientes componentes sociales: (i) viviendas de trabajadores del propio establecimiento, ubicadas a menos de 100 metros del perímetro industrial, con núcleos familiares cuyos miembros conviven directamente con la operación productiva; (ii) un núcleo de asentamiento humano rural de pequeñas dimensiones, con familias dedicadas a actividades de subsistencia y comercio menor, próximas al predio; (iii) reservorios y cursos estacionales de agua utilizados por la comunidad para actividades domésticas y agrícolas, ubicados a menos de 500 metros del predio; y (iv) caminos rurales de acceso compartido con población local. La Figura 1 presenta un croquis esquemático del entorno inmediato, que ilustra la disposición relativa del establecimiento, las viviendas más próximas y los cuerpos de agua del AID; este croquis no sustituye un levantamiento topográfico con coordenadas, sino que ofrece una representación contextual del entorno social del caso.

[Figura 1. Croquis esquemático del entorno inmediato del establecimiento (AID). Elaboración propia.]

Para el análisis del contexto operativo y de cumplimiento ambiental se revisaron los documentos institucionales del establecimiento: la Declaración de Impacto Ambiental emitida por el MADES, la Resolución de habilitación de SENACSA como frigorífico de ganado porcino y la auditoría ambiental bienal elaborada por consultora externa, en cumplimiento del Plan de Gestión Ambiental (PGA) vigente.

3.3. Población, muestra y criterio de selección

La población de estudio correspondió al conjunto de personas vinculadas a las operaciones del frigorífico. La muestra fue intencional o por conveniencia, conformada por ocho informantes clave ($n = 8$): jefes de área (producción, mantenimiento, administración), operadores de sala de faena, recolector de residuos y personal de limpieza. Este tipo de muestreo —consistente con los principios de la investigación cualitativa (Creswell & Poth, 2018)— privilegia la profundidad y la relevancia de la información sobre la representatividad estadística, siendo adecuado cuando el objetivo es comprender procesos y percepciones en contextos específicos. La saturación teórica fue alcanzada a partir de la sexta entrevista, cuando las categorías analíticas emergentes dejaron de incorporar dimensiones nuevas relevantes, lo que valida el tamaño muestral seleccionado.

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Se emplearon tres técnicas complementarias: (1) entrevistas semiestructuradas, con doce preguntas abiertas diseñadas para explorar percepciones sobre tipos y volúmenes de RSO, prácticas de gestión vigentes, dificultades operativas, costos percibidos de tecnologías sostenibles y posibilidades de mejora; las entrevistas fueron realizadas in situ, con duración promedio de 45 minutos, y grabadas con consentimiento informado de los participantes para su transcripción verbatim; (2) ficha de observación documental, aplicada durante la visita al establecimiento para registrar sistemáticamente las condiciones operativas reales, los flujos de residuos observados, las infraestructuras de manejo existentes y las evidencias de cumplimiento o incumplimiento del PGA; (3) análisis documental de registros internos de residuos, protocolos de manejo, el PGA vigente y el informe de auditoría ambiental bienal de la empresa, complementado con verificación directa in situ para contrastar la información documental con la realidad observada.

3.5. Análisis de datos y triangulación

El análisis siguió una estrategia de triangulación metodológica (Denzin, 1978), integrando tres fuentes de información: entrevistas semiestructuradas, documentos institucionales y marco teórico. Las transcripciones de las entrevistas fueron analizadas mediante codificación temática en dos fases: codificación abierta para la identificación de categorías emergentes relevantes para cada objetivo específico, y codificación axial para el establecimiento de relaciones entre categorías y la construcción de redes temáticas (Hecker & Kalpokas, s.f.). El software ATLAS.ti se empleó como herramienta de soporte para la gestión, codificación y visualización de los datos cualitativos. La información documental fue sistematizada en matrices comparativas que contrastaron las prácticas actuales del frigorífico con los estándares de buenas prácticas identificados en la literatura científica y en la normativa ambiental aplicable.

3.6. Consideraciones éticas y limitaciones

La participación de los informantes fue voluntaria e informada. La identidad individual de los entrevistados fue preservada mediante el uso de referencias genéricas a sus roles en la empresa, en cumplimiento de los principios de confidencialidad de la investigación cualitativa. El acceso a documentos institucionales fue autorizado por la dirección del establecimiento. Las principales limitaciones del estudio fueron: la disponibilidad parcial de registros técnicos cuantitativos sobre volúmenes y composición fisicoquímica de RSO, condicionada por la ausencia de sistemas formalizados de monitoreo en el establecimiento; la acotación temporal al año 2024, que impide capturar variaciones longitudinales del proceso productivo y de la generación de residuos; el posible sesgo de deseabilidad social en las respuestas de algunos informantes, mitigado mediante la triangulación con datos documentales y observaciones directas de campo; y la falta de datos analíticos de laboratorio sobre la composición fisicoquímica de los lixiviados y los parámetros de calidad del suelo y el agua en el AID.

4. Resultados

4.1. Tipos, volúmenes e impactos ambientales de los RSO generados

En respuesta al primer objetivo específico, la triangulación de las entrevistas semiestructuradas ($n = 8$) y de la documentación interna del frigorífico permitió identificar diez categorías de residuos asociados al proceso productivo, con sus volúmenes estimados e impactos ambientales potenciales. La Tabla 1 sintetiza los hallazgos en función de la frecuencia de mención por parte de los informantes; dado que las preguntas admitieron respuestas múltiples, la suma de

menciones por categoría es superior al número total de informantes y refleja la importancia perceptual relativa de cada tipo de residuo, no su prevalencia exclusiva.

Tabla 1

Tipos de residuos identificados en el frigorífico bajo estudio (2024)

Tipo de residuo	Menciones	Volumen estimado / observación
Pelo y pezuñas	6	300–500 g por cerdo; retirados por terceros sin tratamiento controlado documentado.
Sangre	5	2,5–3 L por cerdo; sistema de captación instalado pero no operativo al momento del estudio. (Residuo no estrictamente sólido, incluido por integrar el flujo del ciclo productivo.)
Vísceras y tripas	4	Volumen variable; sin tratamiento in situ; acumulación temporal en predio.
Cuero	4	Subproducto del faenado; retirado por terceros; destino final no documentado por el personal entrevistado.
Cubitos de carne y desperdicios del ciclo II	3	Incluidos en los aproximadamente 3.000 kg/día de residuos generales del ciclo productivo.
Envases y embalajes (cartones, bidones, piolines)	3	Reciclaje parcial de metales; resto sin destino formal documentado.
Restos de comida (con servilletas y residuos de limpieza)	2	Aproximadamente una bolsa diaria por sección de comedor; disposición sin separación.
Grasa animal e industrial	2	Parcialmente derivada a graserías externas; volumen sin registro sistemático.
Cenizas y residuos de caldera (leña)	2	Residuos de combustión de leña; sin aprovechamiento documentado. (Residuo no estrictamente sólido en su totalidad, incluido por integrar el flujo de subproductos.)
Aceites de purga de sala de máquinas	1	Residuo especial/peligroso; manejo diferenciado requerido por normativa. (Residuo líquido, incluido por integrar el flujo industrial.)

Nota. *Elaboración propia a partir de entrevistas semiestructuradas ($n = 8$, respuestas múltiples) y análisis documental. Se incluyen también residuos no estrictamente sólidos —sangre, cenizas y aceites de purga— por integrar el flujo de subproductos del ciclo productivo, cuya gestión integrada se considera condición de una estrategia ambiental coherente. La denominación «cachapé»¹ utilizada por algunos informantes corresponde a un vehículo rural paraguayo de tipo carro o acoplado de gran capacidad, empleado para el transporte de cargas a granel.*

Los residuos más frecuentemente mencionados fueron pelo y pezuñas (6 menciones), seguidos de sangre (5), vísceras y tripas (4) y cuero (4). Esta distribución refleja una percepción segmentada del problema: cada funcionario tiende a identificar los residuos directamente vinculados a su área de trabajo, sin una visión transversal del flujo total de residuos en el establecimiento. Esta fragmentación perceptual es, en sí misma, un indicador de la ausencia de una cultura organizacional de gestión ambiental integral, dado que la correcta identificación y cuantificación de todos los flujos es condición necesaria para el diseño de estrategias eficaces de mitigación. La percepción parcializada del impacto ambiental —algunos funcionarios manifestaron no haber observado efectos significativos desde sus puestos de trabajo— coexiste con la mención de indicios concretos de afectación: aumento de la presencia de cuervos en la zona, generación de olores desagradables en días de alta temperatura y acumulación temporal de residuos por falta de proveedores de retiro.

En términos volumétricos, el dato más significativo aportado por los informantes es la generación aproximada de 3.000 kg diarios de residuos generales del ciclo productivo —equivalente a dos «cachapés» por día—, junto con 2,5 a 3 litros de sangre por cerdo sacrificado y entre 300 y 500 g de pelo por animal. Esta cifra corresponde a un promedio diario en condiciones operativas habituales (no constituye un volumen máximo a capacidad nominal de planta) y no refleja registros sistematizados anuales, dado que el establecimiento no dispone de procedimientos formales de pesaje y trazabilidad de residuos. Esta carga orgánica diaria, concentrada en un entorno rural con infraestructura de tratamiento limitada, genera una presión ambiental considerable. Aguilar Arguedas (2020) estima que la descomposición anaeróbica no controlada de RSO a esta escala puede producir entre 150 y 300 m³ de CH₄ diarios, cifra que representa una contribución relevante a las emisiones de GEI del sector a escala local. La proximidad de viviendas, pastizales y cuerpos de agua estacionales al predio industrial amplifica el radio de exposición a estos impactos.

La observación documental evidenció la inexistencia de registros técnicos sistematizados sobre volúmenes reales, composición fisicoquímica e impactos cuantificados de los residuos sobre el suelo o el agua. Se constató que varios residuos son retirados por terceros mediante vehículos externos sin que el personal conozca el destino final ni los procedimientos de disposición aplicados, y que otros se disponen en rellenos transitorios dentro del predio sin tratamiento técnico alguno. La ausencia de sistemas de monitoreo e indicadores de desempeño ambiental impide al establecimiento conocer con precisión su huella ambiental real, lo que a su vez dificulta la planificación de mejoras cuantificables.

4.2. Evaluación de tecnologías y prácticas de gestión vigentes

En atención al segundo objetivo específico, la triangulación de las entrevistas ($n = 8$) y de la auditoría ambiental bienal permitió caracterizar el estado actual de la gestión de RSO y evaluar la viabilidad de tecnologías sostenibles en el contexto local. El establecimiento opera con la Declaración de Impacto Ambiental emitida por el MADES y cuenta con habilitación de SENACSA para faena porcina.

Entre agosto y septiembre de 2023, el frigorífico realizó una remodelación integral del sistema de tratamiento de efluentes líquidos, con una inversión de aproximadamente 130 millones de guaraníes. La intervención incluyó la instalación de tres lagunas anaeróbicas, una pileta de aireación con cascada natural y dos piletas de tratamiento aeróbico final. Simultáneamente, se implementó la sustitución del sistema de refrigeración convencional por tecnología de amoníaco —más eficiente energéticamente y con menor potencial de calentamiento global directo—, la instalación de una huerta orgánica de aproximadamente 200 m² y la mejora de los mecanismos de control de residuos peligrosos. Estos avances demuestran que el establecimiento posee capacidad institucional y financiera para realizar mejoras ambientales significativas cuando existe voluntad directiva y disponibilidad de recursos.

Sin embargo, esta capacidad no se ha trasladado al tratamiento de los RSO sólidos generados en la faena. El análisis de las entrevistas reveló que no existen tecnologías de tratamiento in situ para sangre, vísceras, pelos, cuero ni grasas: la práctica predominante es el retiro diario por medios externos. La indagación documental sobre el destino final de los residuos retirados arrojó resultados parciales y poco consistentes. Los informantes no pudieron identificar con precisión si los operadores externos disponían los RSO en rellenos sanitarios técnicos habilitados, en vertederos a cielo abierto sin habilitación o en otros sitios; en al menos algunos casos se mencionó disposición en predios rurales no habilitados como rellenos sanitarios técnicos, situación recurrente en municipios paraguayos sin infraestructura de disposición controlada. Solo algunos funcionarios mencionaron la clasificación de residuos mediante bolsas diferenciadas por colores, práctica que no responde a un protocolo formalizado ni está vinculada a circuitos de valorización o tratamiento específicos. Un sistema de captación de sangre fue mencionado como instalado, pero no operativo en el momento de la investigación, lo que representa una oportunidad de mejora inmediata sin inversión adicional significativa.

Entre las dificultades estructurales y logísticas identificadas para la adopción de tecnologías sostenibles destacan: la distancia del frigorífico respecto a centros urbanos y proveedores de

servicios especializados; la falta de automatización en los procesos internos de recolección; la dificultad de manipulación de grandes volúmenes de vísceras y tripas; la dependencia de un único operador en ciertas áreas críticas; y la insuficiente formación técnica del personal en materia de gestión ambiental. Todos los entrevistados reconocieron que la adopción de tecnologías sostenibles implicaría costos iniciales significativos para la escala del establecimiento, pero identificaron beneficios potenciales a mediano plazo relacionados con la conservación del entorno, la salud pública, la imagen institucional ante reguladores y la competitividad en mercados con crecientes exigencias de sostenibilidad.

Tabla 2

Evaluación comparativa de tecnologías sostenibles para el tratamiento de RSO en el frigorífico bajo estudio

Tecnología	Costo estimado (Gs.) [USD aprox.]	Beneficios esperados	Limitaciones / condicionantes
Biodigestor anaeróbico (escala media)	Gs. 87.600.000 – 182.500.000 (USD ~12.000 – 25.000)	Generación de biogás aprovechable energéticamente; reducción de carga orgánica de RSO húmedos; disminución de olores y patógenos; producción de bioabono; ahorro en transporte y disposición final.	Requiere operación técnica especializada, condiciones anaeróbicas controladas y habilitación previa del MADES y de SENACSA. Mayor inversión inicial.
Compostaje mecanizado	Gs. 58.400.000 – 109.500.000 (USD ~8.000 – 15.000)	Producción de abono orgánico certificable; mejora de la estructura del suelo; reducción de RSO sólidos de baja humedad; menor costo operativo; mejora de imagen institucional.	Más adecuado para fracciones sólidas de bajo contenido hídrico. Requiere espacio físico y manejo continuo por personal capacitado.
Valorización de subproductos (harinas proteicas / biocombustibles)	Variable según alianza comercial	Reutilización de sangre, vísceras y grasas con retorno económico; reducción del volumen enviado a disposición; alineación con los principios de la economía circular.	Requiere alianzas con operadores industriales habilitados por SENACSA. Depende del mercado regional de subproductos cárnicos.

Nota. Elaboración propia a partir de entrevistas semiestructuradas, revisión documental y costos referenciales del contexto local. Conversión a USD utilizando la cotización referencial de Gs. 7.300 por USD 1. Los rangos amplios reflejan diferencias entre soluciones modulares de baja escala con tecnología regional —correspondientes al extremo inferior— y sistemas industriales de mayor capacidad volumétrica con instrumentación de control automatizado y componentes importados —correspondientes al extremo superior—. Para fines de planificación financiera preliminar, puede utilizarse el valor medio del rango.

La Tabla 2 resume la evaluación comparativa de las tres opciones tecnológicas identificadas como más pertinentes para el contexto local, con sus costos estimados expresados en guaraníes y dólares estadounidenses para facilitar la comparación regional, los beneficios esperados y los principales condicionantes de implementación.

Sobre la base de los rangos presentados, la inversión media estimada para un biodigestor anaeróbico de escala media se sitúa en torno a Gs. 135.000.000 (aproximadamente USD 18.500), y la del compostaje mecanizado en torno a Gs. 84.000.000 (aproximadamente USD 11.500). Estos valores referenciales son útiles para los análisis preliminares de viabilidad económica que el establecimiento deberá realizar como parte del eje 7 de la propuesta. La revisión de la ficha de observación documental confirmó la ausencia de planes formales de gestión de RSO sólidos, de estudios de viabilidad técnica y económica para la adopción de tecnologías limpias, de indicadores de desempeño ambiental específicos en esta materia y de programas sistemáticos de capacitación del personal. La Ley N.º 3956/09 no se aplica de manera formal en el establecimiento respecto a los RSO sólidos, lo que configura una situación de incumplimiento normativo de carácter estructural. No obstante, la existencia de la DIA vigente, el PGA aprobado y la auditoría bienal constituyen instrumentos normativos e institucionales que, adecuadamente actualizados, pueden servir de plataforma para la implementación de la propuesta.

4.3. Propuesta de gestión integral de RSO

En respuesta al tercer objetivo específico, se formuló una propuesta de gestión integral estructurada en siete ejes estratégicos articulados e interdependientes, orientados a transformar la actual gestión reactiva y fragmentada del frigorífico en un sistema planificado, monitoreado y alineado con los principios de la GIRS y de la economía circular. La Tabla 3 presenta los ejes estratégicos, sus descripciones e indicadores de seguimiento propuestos.

El eje 1 —diagnóstico y clasificación— establece las bases habilitantes del sistema: sin información precisa y sistematizada sobre tipos, volúmenes y características de los RSO por área productiva, no es posible diseñar ni priorizar intervenciones tecnológicas adecuadas. La implementación de un protocolo formalizado de trazabilidad interna permitirá al establecimiento conocer su huella ambiental real, cumplir con los requisitos de reporte del PGA ante el MADES y demostrar a los organismos de certificación el compromiso con la mejora continua.

Tabla 3*Ejes estratégicos de la propuesta de gestión integral de RSO para el frigorífico bajo estudio*

Eje estratégico	Descripción y acciones clave	Indicador de seguimiento
1. Diagnóstico y clasificación de RSO	Implementar protocolo formalizado de identificación, cuantificación y clasificación de RSO por área productiva, con código de colores, contenedores diferenciados y trazabilidad interna. Base habilitante del sistema.	kg de RSO clasificados/mes; % de cobertura del sistema de trazabilidad por área.
2. Reducción en origen	Optimizar procesos de faenamiento y capacitar al personal en Buenas Prácticas de Manufactura (BPM), conforme a los Principios Generales de Higiene de los Alimentos del Codex Alimentarius (CAC/RCP 1-1969, Rev. 4-2003) y a las disposiciones de SENACSA aplicables al sector porcino, para minimizar la generación innecesaria de residuos desde el inicio de la cadena.	kg de RSO generados por cerdo sacrificado; N.º de capacitaciones realizadas/año.
3. Reutilización de subproductos orgánicos	Transformar sangre, vísceras y grasas en harinas proteicas o insumos para biocombustibles mediante alianzas formalizadas con operadores industriales regionales habilitados por SENACSA. Activación inmediata del sistema de captación de sangre ya instalado.	Toneladas de subproductos valorizados/mes; ingresos por venta (Gs./mes).
4. Reciclaje con tecnologías limpias	Instalar sistema de compostaje mecanizado para RSO sólidos de baja humedad y, en fase posterior, biodigestor anaeróbico para sangre y vísceras. Generación de biogás y abono orgánico.	m³ de biogás producido/mes; toneladas de compost generado/mes.
5. Fortalecimiento normativo y monitoreo ambiental	Elaborar PGA actualizado conforme a la Ley N.º 3956/09 y a la norma ISO 14001:2015, con énfasis en las cláusulas 6.1.2 (aspectos e impactos ambientales), 8.1 (planificación y control operacional) y 9.1 (seguimiento, medición, análisis y evaluación). Monitoreos semestrales de calidad de suelo, agua y aire en el AID.	N.º de monitoreos/año; % de cumplimiento del PGA; hallazgos de auditoría bienal.
6. Educación ambiental y participación comunitaria	Implementar talleres de sensibilización ambiental para el personal del establecimiento y para líderes comunitarios. Promover corresponsabilidad empresa-comunidad y articulación con autoridades locales.	N.º de talleres/año; % del personal capacitado; encuesta de percepción comunitaria.
7. Evaluación económica y viabilidad técnica	Análisis de costos-beneficios semestral y gestión activa de financiamiento público o cooperación internacional para las inversiones tecnológicas propuestas.	ROI estimado por tecnología; fondos gestionados (Gs.); período de amortización.

Nota. Elaboración propia a partir de los resultados de la investigación, los principios de la jerarquía de gestión de la GIRS y los requisitos de la norma ISO 14001:2015.

El eje 2 —reducción en origen— se sustenta en la capacitación del personal en Buenas Prácticas de Manufactura (BPM). En este eje se proponen, específicamente, los principios y disposiciones del Codex Alimentarius CAC/RCP 1-1969 (Principios Generales de Higiene de los Alimentos) en sus secciones referidas al diseño de instalaciones, al control de operaciones y a la formación del personal manipulador, complementadas con las disposiciones sanitarias de SENACSA aplicables al sector porcino. La adopción de estos referentes acotados permite al establecimiento orientar sus programas de capacitación con criterios técnicos verificables.

El eje 3 —reutilización de subproductos— prevé la transformación de sangre, vísceras y grasas en harinas proteicas o insumos para biocombustibles mediante alianzas formalizadas con operadores industriales regionales habilitados. La activación del sistema de captación de sangre ya instalado, pero no operativo, es el primer paso concreto e inmediato en esta dirección, al no requerir inversión adicional significativa. El eje 4 —reciclaje con tecnologías limpias— propone la instalación progresiva del compostaje mecanizado (fase 1, menor inversión) y del biodigestor anaeróbico (fase 2, mayor impacto), lo que reduce el riesgo financiero y permite acumular experiencia técnica antes de escalar la inversión.

El eje 5 —fortalecimiento normativo y monitoreo— aborda la brecha de incumplimiento identificada mediante la elaboración de un PGA actualizado con indicadores específicos para RSO sólidos, monitoreos semestrales de calidad ambiental y articulación formal con el MADES, SENACSA y la Municipalidad correspondiente. En este eje se proponen como referentes acotados de la norma ISO 14001:2015 las cláusulas 6.1.2 sobre identificación de aspectos e impactos ambientales, 8.1 sobre planificación y control operacional y 9.1 sobre seguimiento, medición, análisis y evaluación del desempeño, por considerarse las de mayor pertinencia técnica para el contexto del establecimiento. El eje 6 —educación ambiental— promueve el cambio cultural organizacional y la corresponsabilidad empresa-comunidad mediante talleres de sensibilización para personal y líderes comunitarios. El eje 7 —evaluación económica— contempla el análisis continuo de costos-beneficios y la gestión activa de financiamiento público o cooperación internacional para las inversiones tecnológicas propuestas.

La implementación escalonada de los siete ejes —partiendo de los de menor inversión y mayor impacto organizacional inmediato (ejes 1, 2, 5 y 6) y avanzando progresivamente hacia las inversiones tecnológicas (ejes 3, 4 y 7)— permite adaptar la propuesta a la capacidad financiera real del establecimiento y generar resultados demostrables en el corto plazo que faciliten la obtención de financiamiento adicional para las etapas tecnológicas posteriores.

5. Discusión

Los resultados de esta investigación confirman plenamente la hipótesis planteada: las prácticas de gestión de RSO en el frigorífico bajo estudio no constituyen una estrategia de mitigación integral, sino un conjunto de acciones reactivas orientadas al cumplimiento documental mínimo, sin planificación estratégica ni indicadores de desempeño ambiental. Este hallazgo es coherente con lo documentado por Acero et al. (2013) para frigoríficos colombianos y por Rodas Torres (2018) para el sector bovino paraguayo, sugiriendo la existencia de patrones estructurales comunes en la gestión ambiental del sector cárnico regional, vinculados a barreras económicas, tecnológicas, institucionales y culturales recurrentes.

La variedad y los volúmenes de RSO identificados —aproximadamente 3.000 kg diarios de residuos del ciclo productivo y 2,5–3 litros de sangre por cerdo— son consistentes con los rangos reportados por Treichel et al. (2016) para frigoríficos porcinos de escala similar en América del Sur, quienes estiman entre 4 y 8 kg de RSO por animal sacrificado en establecimientos de mediana escala. Treichel et al. (2016) también identifican la ausencia de sistemas de monitoreo y registro técnico de emisiones como uno de los principales obstáculos para la mejora del desempeño ambiental en el sector, observación que coincide directamente con lo observado en el caso analizado: la falta de mediciones impide cuantificar con precisión la contribución real al balance de GEI, lo que representa tanto una limitación del presente estudio como una línea prioritaria de investigación futura. La descomposición anaeróbica no controlada de estos residuos genera emisiones de CH₄ y NH₃ que agravan el cambio climático y deterioran la calidad del aire local (Aguilar Arguedas, 2020; IPCC, 2021).

Los avances registrados en el sistema de tratamiento de efluentes líquidos en 2023 demuestran la capacidad institucional del establecimiento para realizar mejoras ambientales significativas cuando existen voluntad directiva y financiamiento. La ausencia de una inversión equivalente en el tratamiento de RSO sólidos revela una asimetría preocupante en la concepción de la gestión ambiental de la empresa. Esta asimetría puede explicarse, en parte, por la mayor visibilidad regulatoria del componente de efluentes líquidos —que recibe seguimiento directo del MADES mediante la auditoría bienal del PGA y la Resolución MADES N.º 770/2014— frente a los RSO sólidos, que carecen de una reglamentación técnica específica en el ordenamiento paraguayo. Cerrar esta brecha regulatoria es una tarea pendiente del Estado que impacta directamente en la capacidad de respuesta ambiental del sector.

La evaluación de tecnologías sostenibles confirma la viabilidad técnica y económica de la biodigestión anaeróbica y el compostaje mecanizado en el contexto local, en línea con los resultados de Nayak & Bhushan (2019) y Paredes et al. (2022) para contextos agroindustriales similares de América Latina. Estudios realizados en frigoríficos porcinos de Brasil y Argentina reportan reducciones superiores al 70 % en la carga orgánica de los efluentes y eliminaciones por encima del 90 % de patógenos mediante biodigestión, con períodos de retorno de inversión de 3 a 6 años en función del precio local de la energía (Serna-Jiménez et al., 2018). Estos plazos son coherentes con las condiciones del mercado paraguayo, especialmente si se consideran los ahorros en costos de transporte y disposición final, el valor del biogás generado y los potenciales ingresos por venta de bioabono o subproductos. La implementación escalonada propuesta — iniciando con el compostaje, de menor inversión, y evolucionando hacia la biodigestión— reduce el riesgo financiero y resulta coherente con las capacidades actuales del establecimiento.

La falta de capacitación sistemática del personal emerge en este estudio como una de las barreras más críticas para la implementación de cualquier mejora ambiental. Bermúdez et al. (2022) identificaron la capacitación del personal operativo como uno de los predictores más fuertes del desempeño ambiental en empresas agroalimentarias latinoamericanas, por encima de la disponibilidad de tecnología o el rigor del marco normativo vigente; Choles Vidal (2013) demostró además que la capacitación en BPM puede reducir entre un 15 % y un 25 % la generación de RSO sin inversiones adicionales significativas. Leiton Rodríguez & Revelo Maya (2017) identifican la formación del personal como el factor más determinante del éxito a largo plazo de los sistemas de gestión de RSO en empresas agroindustriales. Estos hallazgos subrayan que la dimensión humana y organizacional de la gestión ambiental es tan determinante como la dimensión tecnológica.

Desde la perspectiva de la economía circular, la propuesta de siete ejes representa una transición del modelo lineal «producir–usar–desechar» hacia un modelo en el que los RSO del frigorífico se convierten en insumos productivos —biogás, bioabono, harinas proteicas— cerrando ciclos de materiales y energía (Geissdoerfer et al., 2017). La gestión activa de financiamiento público o cooperación internacional, incluyendo líneas del Banco Interamericano de Desarrollo (BID, 2022) específicas para proyectos de gestión de residuos en pequeñas y medianas empresas latinoamericanas, constituye una vía concreta para viabilizar las inversiones más significativas. La transición genera co-beneficios múltiples: reduce el impacto ambiental del establecimiento, crea oportunidades de ingresos adicionales, mejora la imagen institucional y fortalece la resiliencia económica frente a aumentos en los costos de disposición final. El modelo tiene,

además, potencial de replicabilidad en otros frigoríficos paraguayos de escala similar, contribuyendo a la mejora del desempeño ambiental sectorial y aportando evidencia empírica para el diseño de políticas públicas más específicas y eficaces.

6. Conclusiones

La presente investigación permitió caracterizar con precisión la problemática ambiental asociada a la gestión de RSO en un frigorífico porcino del Paraguay central durante el año 2024 y formular una propuesta de estrategia integral de mitigación con sustento empírico y respaldo teórico actualizado, que responde a los tres objetivos específicos planteados.

En relación con el primer objetivo, se identificaron diez categorías de residuos asociados al proceso productivo —siendo las más significativas la sangre (2,5–3 L por cerdo), las vísceras y tripas, los pelos y pezuñas, el cuero y los residuos generales del ciclo (≈ 3.000 kg/día como promedio operativo habitual)—, cuya acumulación sin tratamiento técnico controlado representa un riesgo directo para el suelo, el agua subterránea y superficial, y la salud pública de la comunidad circundante. La descomposición anaeróbica no controlada de esta carga orgánica genera emisiones de CH_4 y NH_3 con alto potencial de calentamiento global (Aguilar Arguedas, 2020; IPCC, 2021), en contradicción con los compromisos climáticos asumidos por Paraguay en el Acuerdo de París (2015) y con los ODS 12 y 13.

Respecto al segundo objetivo, se constató que el establecimiento carece de tecnologías de tratamiento in situ para los RSO sólidos y de planificación estratégica en esta materia, a pesar de los avances relevantes registrados en el sistema de efluentes líquidos. La evaluación comparativa de tecnologías sostenibles —biodigestión anaeróbica (Gs. 87,6–182,5 millones; USD 12.000–25.000), compostaje mecanizado (Gs. 58,4–109,5 millones; USD 8.000–15.000) y valorización de subproductos— demostró la viabilidad técnica y económica de estas opciones a mediano plazo, con períodos de retorno de inversión de 3 a 6 años y beneficios ambientales cuantificables en reducción de emisiones, mejora de la calidad del suelo y el agua, y eliminación de riesgos sanitarios para la comunidad.

En cuanto al tercer objetivo, se formuló una propuesta de gestión integral estructurada en siete ejes estratégicos —diagnóstico, reducción en origen, reutilización de subproductos, reciclaje con tecnologías limpias, fortalecimiento normativo, educación ambiental y evaluación económica— alineada con la GIRS, la economía circular, la Ley N.º 3956/09 y la norma ISO 14001:2015 (cláusulas 6.1.2, 8.1 y 9.1). La hipótesis central fue plenamente confirmada: la

gestión actual responde al cumplimiento documental mínimo sin visión articulada de sostenibilidad. La propuesta demuestra que una gestión integral es no solo necesaria, sino factible en el contexto del establecimiento, mediante una implementación escalonada adaptada a su capacidad financiera real.

Las implicaciones del estudio trascienden el caso analizado. A nivel empresarial, la propuesta ofrece una hoja de ruta accionable con indicadores medibles y beneficios económicos y reputacionales demostrables. A nivel sectorial, el modelo es replicable en otros frigoríficos paraguayos de escala similar, contribuyendo a la mejora colectiva del desempeño ambiental de la industria cárnica nacional. A nivel de política pública, los hallazgos aportan evidencia concreta para el diseño de regulaciones sectoriales específicas sobre gestión de RSO sólidos en frigoríficos —colmando el vacío normativo identificado a nivel nacional, departamental y municipal— y para la articulación de programas de apoyo técnico y financiero a establecimientos con limitaciones estructurales.

Las líneas de investigación futura recomendadas son: la cuantificación experimental de las emisiones de GEI atribuibles a la gestión actual de RSO mediante sensores de campo y modelos de estimación validados para el contexto subtropical; el diseño e implementación piloto del biodigestor anaeróbico propuesto, con medición de parámetros de rendimiento en condiciones locales; y un estudio comparativo de estrategias de gestión ambiental en frigoríficos de distintas escalas en Paraguay, orientado a identificar factores críticos de éxito y a construir una base de evidencia sólida para la formulación de políticas públicas sectoriales más efectivas en materia de gestión ambiental industrial.

Referencias

- Acero, R., Riaño, G., & Cardona, D. (2013). Evaluación del sistema de gestión ambiental de los frigoríficos cárnicos en Colombia. Universidad Libre de Colombia. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6676000>
- Acuerdo de París. (2015). Acuerdo de París – Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. UNFCCC. https://unfccc.int/sites/default/files/spanish_paris_agreement.pdf
- Aguilar Arguedas, A. (2020). Emisiones de gases de efecto invernadero en el tratamiento de residuos. *Ambientico*, 274, 5–12. Universidad Nacional de Costa Rica.
- Banco Interamericano de Desarrollo [BID]. (2022). Financiamiento para la gestión de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. BID. <https://www.iadb.org>

- Bermúdez, M., García, L., & Torres, R. (2022). Environmental management in Latin American agri-food SMEs: Drivers, barriers and performance outcomes. *Journal of Cleaner Production*, 330, 129801. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129801>
- Choles Vidal, A. (2013). *Gestión integral de residuos sólidos orgánicos en pequeñas industrias alimentarias*. Editorial UCR.
- Codex Alimentarius. (2003). *Principios Generales de Higiene de los Alimentos (CAC/RCP 1-1969, Rev. 4-2003)*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura / Organización Mundial de la Salud.
- Creswell, J. W., & Poth, C. N. (2018). *Qualitative inquiry and research design: Choosing among five approaches* (4.^a ed.). SAGE Publications.
- Denzin, N. K. (1978). *The research act: A theoretical introduction to sociological methods* (2.^a ed.). McGraw-Hill.
- FAO. (2020). *Gestión de residuos agroindustriales en América Latina: marco normativo y buenas prácticas*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- FAO. (2021). *The state of the world's land and water resources for food and agriculture*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cb7654en>
- Flick, U. (2018). *An introduction to qualitative research* (6.^a ed.). SAGE Publications.
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The circular economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- Hecker, J., & Kalpokas, N. (s.f.). *Guía para el análisis temático*. ATLAS.ti. <https://atlasti.com/es/guias/analisis-tematico>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.^a ed.). McGraw-Hill.
- Hoornweg, D., & Bhada-Tata, P. (2012). *What a waste: A global review of solid waste management*. World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/17388>
- IPCC. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- ISO. (2015). *ISO 14001:2015 – Environmental management systems: Requirements with guidance for use*. International Organization for Standardization.
- Jantz, M. N., & Ruggerio, C. A. (2021). Tratamiento de los residuos sólidos orgánicos domésticos como estrategia para la mitigación del impacto ambiental negativo en áreas urbanas. *Ambiente en Diálogo*, 2, e026. <https://doi.org/10.59495/amd.v0i2.26>

- Leiton Rodríguez, N. V., & Revelo Maya, W. G. (2017). Gestión integral de residuos sólidos en la empresa CYRGO SAS. *Producción + Limpia*, 12(1), 98–109. <https://doi.org/10.22507/pml.v12n1a7>
- Ley N.º 294. (1993). Evaluación de Impacto Ambiental. Honorable Congreso de la Nación, Paraguay.
- Ley N.º 426. (1994). Carta Orgánica del Gobierno Departamental. Honorable Congreso de la Nación, Paraguay.
- Ley N.º 716. (1996). Que sanciona delitos contra el medio ambiente. Honorable Congreso de la Nación, Paraguay.
- Ley N.º 3956. (2009). Gestión Integral de los Residuos Sólidos en la República del Paraguay. <https://faolex.fao.org/docs/pdf/par123260.pdf>
- Ley N.º 3966. (2010). Orgánica Municipal. Honorable Congreso de la Nación, Paraguay.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería [MAG]. (2023). Boletín estadístico del sector ganadero – Paraguay 2023. MAG. <https://www.mag.gov.py>
- Nayak, A., & Bhushan, B. (2019). An overview of the recent trends on the waste valorization techniques for food wastes. *Journal of Environmental Management*, 233, 352–370. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.12.041>
- Paredes, C., Cayuela, M. L., & Roig, A. (2022). Composting of organic waste streams: A review of recent advances and future challenges. *Bioresource Technology*, 344, 126260. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126260>
- Resolución MADES N.º 770/2014. (2014). Por la cual se establecen los estándares de calidad ambiental para los efluentes líquidos. Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible, Paraguay.
- Rodas Torres, R. D. (2018). Estado actual en el manejo de residuos por parte de frigoríficos bovinos paraguayos. Repositorio CONACYT. <https://repositorio.conacyt.gov.py>
- Serna-Jiménez, J. A., Torres-Valenzuela, L. S., Serna-Jiménez, V. I., & Martínez-Correa, H. A. (2018). Alternatives for the use of slaughterhouse by-products in Latin America. *Waste Management & Research*, 36(11), 998–1012. <https://doi.org/10.1177/0734242X18801558>
- Stake, R. E. (2007). Investigación con estudio de casos (4.ª ed.). Ediciones Morata.
- Treichel, H., Colla, L. M., Costa, J. A. V., & Dalastra, C. (2016). Environmental impacts and waste management in pork slaughterhouses: A systematic review. *Journal of Environmental Management*, 182, 60–68. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.07.044>
- Yin, R. K. (2018). Case study research and applications: Design and methods (6.ª ed.). SAGE Publications.