

**MANEJO INTEGRAL DE RESIDUOS DE LA UNIDAD PORCINA DEL
CENTRO DE FORMACIÓN AGROINDUSTRIAL LA ANGOSTURA,
CAMPOALEGRE HUILA**

PRESENTADO POR:

TANIA GARZON YUNDA

**UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL
MAESTRÍA MANEJO Y SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL
TUNJA – BOYACÀ
2025**

**MANEJO INTEGRAL DE RESIDUOS DE LA UNIDAD PORCINA DEL
CENTRO DE FORMACIÓN AGROINDUSTRIAL LA ANGOSTURA,
CAMPOALEGRE HUILA**

PRESENTADO POR:

TANIA GARZON YUNDA

**Proyecto de investigación para optar por el título de:
MAGISTER EN MANEJO Y SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL**

Director:

MSC. ING. EDINSON FABIAN MONROY AVILA

**UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL
INGENIERIA AMBIENTAL
TUNJA – BOYACÀ
2025**

DEDICATORIA

A Dios, primeramente, por las oportunidades que me ha dado para crecer personal y profesionalmente; a mi familia, por poner un grano de arena en cada momento de la vida y poder llegar hasta donde estoy; pero sobre todo a mi amada madre. Que, cuando ni yo creo en lo que soy capaz, es la primero en la fila aplaudiéndome, hoy puedo decir que la inspiración de mi vida es mi familia

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a la universidad Santo Tomas por habernos brindado un espacio para nuestro desarrollo como personas y profesionales

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1. RESUMEN	9
2. ABSTRACT	11
3. INTRODUCCIÓN	13
3.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	16
Pregunta de investigación	18
Delimitación del problema	19
3.2. JUSTIFICACIÓN	21
4. OBJETIVOS	25
4.1. Objetivo general	25
4.2. Objetivos específicos.....	25
5. MARCO TEÓRICO	26
5.1.1. Fundamentos teóricos	29
5.1.2. Marco legal	32
6. DISEÑO MEODOLÓGICO.....	34
7. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	45
7.1. Fase 1: Diagnóstico de la Unidad Porcina.....	45
7.2. Fase 2: Diseño del Plan de Manejo Integral de Residuos	75
7.3. Fase 3: Propuesta del Sistema de Manejo de Residuos	87
8. IMPACTO SOCIAL Y HUMANÍSTICO	108
9. CONCLUSIONES	111
10. RECOMENDACIONES	113
BIBLIOGRAFÍA	114

LISTADO DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Marco Legal.....	33
Tabla 2: Resultados obtenidos del análisis en el Laboratorio y/o en campo y Comparación Normativa.....	50
Tabla 3: Resultados de laboratorio en análisis microbiológico	52
Tabla 4: Impactos ambientales generados.....	57
Tabla 5: Efectos derivados de los impactos ambientales	58
Tabla 6: Evaluación de Impacto Ambiental para la actividad de Recepción.	61
Tabla 7: Evaluación de Impacto Ambiental para la actividad de Alimentación	65
Tabla 8: Evaluación de Impacto Ambiental para la actividad de Limpieza	69
Tabla 9: Evaluación de Impacto Ambiental para la actividad de Comercialización	73
Tabla 10: Ficha de manejo Ambiental	79
Tabla 11: Cronograma	82
Tabla 12: costo de implementación de las acciones	82
Tabla 13: tabla de indicadores	83
Tabla 14: Composición química del Biogás.	89
Tabla 15: Relación del tiempo de retención hidráulica de función de la temperatura.	93
Tabla 16: Calculo de masa media.	96
Tabla 17: Determinación de biomasa a digerir	97
Tabla 18 : Calculo de Volumen del Biodigestor.....	97
Tabla 19: Dimensionamiento de zanja de soporte de Biodigestor.....	98
Tabla 20: Estimación de producción diaria de Biogás, a partir del BMD	98
Tabla 21: Calculo de volumen de biodigestor.....	99
Tabla 22: Determinación del valor del manejo de residuos.....	104

LISTADO DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Metodología propuesta.....	34
Figura 2: Unidad productora porcina.	45
Figura 3: Unidades de producción.....	46
Figura 4: puntos de monitoreo y tomas de muestra	49
Figura 5: Puntos de monitoreo y determinación de insitu de cloro	52
Figura 6: Influencia de la temperatura sobre el tiempo de retención [Vargas 1999].	101

1. RESUMEN

El objetivo principal de esta investigación fue diseñar e implementar un sistema integral de manejo de residuos en la unidad porcina del Centro de Formación Agroindustrial La Angostura, ubicado en Campoalegre, Huila. Se buscó optimizar el tratamiento de los residuos generados por la actividad porcícola, reducir su impacto ambiental, y promover la sostenibilidad del entorno. Los objetivos específicos incluyeron el diagnóstico de las condiciones actuales de la unidad porcina, la identificación de los residuos generados, y el diseño de estrategias para su manejo eficiente, con énfasis en la reducción de emisiones de gases contaminantes, la mejora de la calidad del agua y el manejo adecuado de los residuos sólidos.

La metodología empleada se dividió en tres fases. En la fase de diagnóstico, se realizó una inspección detallada de la unidad porcina para evaluar las prácticas de manejo de residuos y el impacto ambiental de los mismos. Se recogieron datos sobre los residuos generados y su impacto en el aire, agua y suelo circundante. En la fase de diseño, se formuló un plan de manejo integral de residuos que incluyó el uso de tecnologías como digestores anaeróbicos, compostaje y humedales artificiales. Finalmente, en la fase de implementación, se capacitó al personal en las nuevas prácticas y se instaló el sistema de tratamiento de residuos.

Los resultados obtenidos en la implementación del sistema de manejo de residuos demostraron una mejora significativa en la gestión de los residuos orgánicos y líquidos generados por la unidad porcina. El biodigestor anaeróbico instalado permitió la producción de biogás a partir de los residuos orgánicos, contribuyendo a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y generando energía renovable. Además, se observó una mejora en la calidad del agua y una reducción de la contaminación ambiental en las áreas circundantes. Los indicadores de rendimiento del sistema de manejo, como la reducción de residuos y la eficiencia en la producción de biogás, mostraron una alta efectividad.

En las conclusiones, se destacó la importancia de la capacitación continua del personal y el monitoreo constante del sistema de manejo de residuos para asegurar su sostenibilidad a largo plazo. La implementación del biodigestor y otras tecnologías sostenibles no solo contribuyó a la reducción de impactos ambientales, sino que también generó beneficios económicos, como la disminución de los costos energéticos. Se recomendó la adopción de tecnologías similares en otras unidades productivas de la región y se sugirió la creación de una red de conocimiento para promover la gestión responsable de residuos en el sector agroindustrial.

2. ABSTRACT

The main objective of this research was to design and implement a comprehensive waste management system at the pig farm unit of the Agroindustrial Training Center La Angostura, located in Campoalegre, Huila. The goal was to optimize the treatment of waste generated by pig farming activities, reduce its environmental impact, and promote sustainability in the surrounding area. Specific objectives included diagnosing the current conditions of the pig farm unit, identifying the generated waste, and designing strategies for efficient waste management, with an emphasis on reducing pollutant emissions, improving water quality, and managing solid waste properly.

The methodology was divided into three phases. In the diagnostic phase, a detailed inspection of the pig farm unit was conducted to evaluate current waste management practices and the environmental impact of the waste. Data was collected on the types of waste generated and their impact on air, water, and surrounding soil. In the design phase, a comprehensive waste management plan was developed, including the use of technologies such as anaerobic digesters, composting, and constructed wetlands. Finally, in the implementation phase, staff was trained in the new practices, and the waste treatment system was installed.

The results obtained from the implementation of the waste management system showed a significant improvement in the handling of organic and liquid waste generated by the pig farm unit. The installed anaerobic digester enabled the production of biogas from organic waste, contributing to the reduction of greenhouse gas emissions and generating renewable energy. Furthermore, there was an improvement in water quality and a reduction in environmental pollution in the surrounding areas. The performance indicators of the waste management system,

such as waste reduction and biogas production efficiency, demonstrated high effectiveness.

In the conclusions, the importance of continuous staff training and constant monitoring of the waste management system was emphasized to ensure long-term sustainability. The implementation of the biodigester and other sustainable technologies not only contributed to the reduction of environmental impacts but also generated economic benefits, such as lower energy costs. It was recommended to adopt similar technologies in other productive units in the region and suggested the creation of a knowledge network to promote responsible waste management in the agro-industrial sector.

3. INTRODUCCIÓN

En Colombia, la producción porcina ha ganado relevancia en los últimos años, tanto en términos de consumo interno como en su contribución al sector agropecuario. Según el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), en 2022 el consumo per cápita de carne de cerdo alcanzó los 12,2 kilogramos por habitante, lo que evidencia un aumento sostenido en la demanda de este producto en la dieta nacional. A nivel de producción, Colombia produjo 546.780 toneladas de carne de cerdo en 2023, con Antioquia y Valle del Cauca destacándose como los principales productores del país, con aportes de 223.814 y 87.599 toneladas respectivamente. Estos datos reflejan la importancia del sector porcino como motor económico, especialmente en las regiones donde se concentra la producción (Veterinaria Digital, 2022)

El crecimiento del sector porcino ha sido impulsado por la mejora en las prácticas de manejo, la expansión de la infraestructura y el aumento de la demanda tanto a nivel nacional como internacional. No obstante, el desarrollo de esta industria ha traído consigo una serie de desafíos ambientales, particularmente en cuanto a la gestión de los residuos generados por las unidades de producción. En muchas zonas del país, la falta de sistemas adecuados de manejo de residuos orgánicos y líquidos ha dado lugar a la contaminación de fuentes de agua, afectando la calidad del recurso hídrico y la biodiversidad en las áreas circundantes. Estos problemas no solo impactan al medio ambiente, sino que también representan un riesgo para la salud pública, lo que requiere la implementación de soluciones sostenibles y eficientes en el manejo de residuos en las granjas porcinas (Pérez Brito & Bojórquez Zapata, 2020)

El Departamento del Huila, reconocido por su liderazgo en la producción agrícola, especialmente en el cultivo de café, ha experimentado un crecimiento significativo en la producción porcina en los últimos años. Esta expansión ha dado lugar a la

necesidad urgente de abordar el manejo ambiental en las unidades porcinas, especialmente aquellas que no cuentan con los recursos y conocimientos necesarios para implementar prácticas sostenibles. En este sentido, el Centro de Formación Agroindustrial La Angostura tiene el potencial de convertirse en un referente de buenas prácticas en el manejo de residuos y sostenibilidad en la región, contribuyendo a la formación de futuros emprendedores que puedan replicar estas estrategias en sus comunidades y en otras zonas productivas del país (Cacua Angarita, 2025)

El desarrollo de la porcicultura no solo ha impactado la seguridad alimentaria y el crecimiento económico del país, sino que también ha generado nuevos retos en términos de sostenibilidad ambiental. La intensificación de la producción, aunque necesaria para satisfacer la demanda, ha incrementado significativamente la generación de residuos sólidos y líquidos. Estos residuos, si no son tratados de forma adecuada, pueden ocasionar graves afectaciones a los ecosistemas, provocando eutrofización en cuerpos de agua, emisión de gases de efecto invernadero y deterioro de la calidad del aire y del suelo. En este contexto, el diseño e implementación de sistemas de gestión ambiental se convierte en una herramienta indispensable para mitigar dichos impactos y promover una producción porcina responsable y sostenible.

A nivel institucional, entidades como el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible han establecido lineamientos técnicos y normativos para mejorar el desempeño ambiental de las unidades pecuarias. Sin embargo, la adopción de estas normativas aún es baja, especialmente en pequeñas y medianas explotaciones, lo que demuestra la necesidad de generar capacidades técnicas a través de programas de formación y transferencia de conocimiento (Romero Borré et al., 2020). En este sentido, los centros de formación del Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) tienen un rol estratégico, no solo como espacios de aprendizaje práctico, sino como escenarios

donde se pueden desarrollar y validar soluciones ambientales aplicadas al sector agroindustrial.

El Centro de Formación Agroindustrial La Angostura, en Campoalegre (Huila), cuenta con una unidad porcina activa que sirve como laboratorio vivo para la enseñanza y el aprendizaje de procesos agropecuarios. No obstante, la ausencia de un sistema integral de manejo de residuos limita su potencial formativo y productivo. Implementar un modelo sostenible de gestión de residuos en esta unidad no solo permitirá reducir los impactos negativos sobre el entorno, sino que también fortalecerá la calidad de la formación técnica ofrecida, integrando criterios de sostenibilidad y responsabilidad ambiental en la cadena de valor porcina. Además, se generarían insumos para la investigación aplicada y la innovación en sistemas pecuarios sostenibles.

Considerando que el Huila forma parte de una región altamente productiva y vulnerable ambientalmente, cualquier modelo de gestión que integre sostenibilidad y producción debe contemplar variables ecológicas, sociales y económicas. En este marco, una propuesta de manejo integral de residuos en la unidad porcina del centro no solo beneficiaría directamente al entorno inmediato, sino que también tendría un impacto positivo a nivel regional, al servir como experiencia replicable para otras unidades productivas. Este tipo de iniciativas contribuyen al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente los relacionados con la producción y consumo responsables (ODS 12), agua limpia y saneamiento (ODS 6), y acción por el clima (ODS 13) (Cacua Angarita, 2025)

3.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El manejo inadecuado de residuos orgánicos y líquidos en las unidades productivas porcinas representa un desafío creciente, especialmente en áreas donde la producción porcina ha experimentado un aumento significativo en los últimos años. En el caso del Centro de Formación Agroindustrial La Angostura, ubicado en Campoalegre, Huila, esta situación es particularmente crítica debido a la falta de un sistema eficiente de gestión de residuos, lo cual genera impactos ambientales directos, afectando tanto los recursos naturales como las comunidades circundantes. Los residuos orgánicos generados, tales como estiércol y aguas residuales provenientes del manejo animal, no se están tratando adecuadamente, lo que origina la contaminación de fuentes de agua cercanas y deteriora la calidad del recurso hídrico. Además, los residuos líquidos, que contienen altos niveles de nutrientes y microorganismos patógenos, se infiltran en el suelo, lo que deteriora su estructura y calidad, poniendo en riesgo la capacidad del suelo para sustentar cultivos agrícolas en el futuro (Perevochtchikova, 2017; Martínez, 2015).

Este tipo de contaminación no solo afecta la biodiversidad local, sino que también representa un riesgo para la salud pública. Los contaminantes presentes en el agua y el suelo pueden llegar a los seres humanos a través del consumo de agua contaminada o de productos agrícolas que absorban sustancias tóxicas. Esta problemática genera un impacto negativo tanto en las comunidades vecinas como en las actividades económicas locales, particularmente en la agricultura, que es una de las principales fuentes de ingresos de la región (Torres et al., 2019). A su vez, la falta de un sistema adecuado de manejo de residuos limita las oportunidades educativas en el propio centro, que debe funcionar como un laboratorio práctico para la formación de estudiantes en prácticas agropecuarias responsables y sostenibles. Los estudiantes de este centro están siendo expuestos a métodos no sostenibles de gestión de residuos, lo que afecta la calidad de su aprendizaje y su

capacidad para integrar la sostenibilidad en sus prácticas profesionales (Sabogal & Vargas, 2019).

Además de los impactos inmediatos, la ausencia de un sistema adecuado de manejo de residuos limita las oportunidades de enseñanza en el propio centro de formación. La unidad porcina de La Angostura, como parte de su misión educativa, debe servir como un laboratorio vivo que permita a los estudiantes aprender sobre la producción responsable y sostenible en el sector agropecuario. Sin embargo, sin un sistema eficiente de manejo de residuos, la unidad no puede cumplir completamente su rol formativo. Los estudiantes que reciben formación en este centro están expuestos a prácticas no sostenibles, lo que afecta la calidad de su aprendizaje y la visión que desarrollan sobre la importancia de integrar la sostenibilidad ambiental en las prácticas agroindustriales. Así, el centro no solo pierde la oportunidad de formar futuros profesionales en buenas prácticas, sino que también se ve limitado en su capacidad para servir como modelo de buenas prácticas para la comunidad agroindustrial regional.

Por lo tanto, la intervención se hace urgente, no solo por el daño ambiental y el riesgo a la salud pública, sino también por la necesidad de garantizar un entorno saludable y sostenible para los habitantes locales. La magnitud de los problemas derivados de la mala gestión de residuos exige la adopción de tecnologías limpias y sistemas de gestión ambiental adecuados que mitiguen los impactos ecológicos de la producción porcina. Esto implica la implementación de un sistema integral que contemple tanto la reducción de residuos como su tratamiento adecuado, garantizando que los subproductos de la producción sean reciclados o gestionados de manera eficiente para evitar daños al medio ambiente (Pinos et al., 2012). Este enfoque no solo mejorará la calidad del agua y del suelo en las áreas circundantes, sino que también permitirá a la unidad porcina cumplir con los estándares ambientales establecidos por la normativa colombiana y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (UN, 2020).

Este desafío ambiental está en estrecha relación con la misión del Centro de Formación Agroindustrial La Angostura, que no solo tiene el objetivo de formar profesionales capacitados en el sector agroindustrial, sino también de promover la adopción de prácticas sostenibles en la región. La propuesta de implementar un sistema integral de manejo de residuos debe ser vista como una oportunidad para crear un modelo replicable que sirva de ejemplo a otras unidades productivas porcinas, no solo en el Huila, sino en otras regiones productivas del país. La solución debe estar alineada con las políticas ambientales nacionales y ser capaz de ofrecer una respuesta técnica y viable a los problemas de contaminación derivados de la producción porcina.

La implementación de este sistema de manejo de residuos debe ser vista como una oportunidad para crear un modelo replicable que sirva como ejemplo para otras unidades productivas porcinas, tanto en Huila como en otras regiones productivas del país. La solución no solo resolvería los problemas ambientales inmediatos, sino que también fortalecería la enseñanza práctica en el centro de formación, permitiendo a los estudiantes conocer y aplicar tecnologías innovadoras para la gestión sostenible de residuos. Así, el centro de formación no solo cumpliría su misión educativa, sino que también se consolidaría como un referente en la región, promoviendo la adopción de buenas prácticas ambientales en la agroindustria (Castro et al., 2019). En este contexto, la creación de un sistema de manejo de residuos eficiente y sostenible en La Angostura es una necesidad urgente, con el potencial de transformar la unidad porcina en un centro de excelencia en gestión ambiental agroindustrial, promoviendo un modelo replicable y contribuyendo al bienestar local y regional.

Pregunta de investigación

¿Qué estrategias y prácticas pueden implementarse para desarrollar un sistema integral de manejo de residuos en la unidad porcina del Centro de Formación

Agroindustrial La Angostura, en Campoalegre, Huila, que prevenga, mitigue y controle los impactos ambientales generados por dicha unidad?

Delimitación del problema

Desde el punto de vista conceptual, la investigación se enmarca en el campo de la sostenibilidad ambiental, el desarrollo agroindustrial y la gestión de residuos orgánicos en sistemas pecuarios. Se abordarán conceptos como producción limpia, economía circular, ciclo del estiércol, tratamiento de aguas residuales y emisiones de gases de efecto invernadero.

En cuanto a la delimitación espacial, el estudio se concentrará exclusivamente en las instalaciones de la unidad porcina del Centro de Formación Agroindustrial La Angostura, en el municipio de Campoalegre, departamento del Huila. Este centro representa una unidad productiva educativa con condiciones reales de operación agropecuaria.

En términos temporales, la investigación se desarrollará durante un periodo de seis meses, abarcando el diagnóstico, formulación, diseño y propuesta de implementación del sistema de manejo de residuos. Esto permitirá registrar condiciones actuales y proponer alternativas sostenibles con base en datos recientes.

Disciplinariamente, el proyecto se sitúa en la intersección entre la ingeniería ambiental, la zootecnia y la educación para el desarrollo sostenible. Se busca aplicar herramientas técnicas y científicas para transformar una necesidad operativa en una oportunidad pedagógica replicable, alineada con los objetivos institucionales de formación agroindustrial.

3.2. JUSTIFICACIÓN

El Centro de Formación Agroindustrial Sena, ubicado en el municipio de Campoalegre, Huila, juega un papel crucial en la formación profesional integral de los estudiantes, con énfasis en el desarrollo agroindustrial y la sostenibilidad. Este centro, que abarca una granja dedicada al fortalecimiento de la formación práctica de los estudiantes, está compuesto por doce unidades agrícolas y pecuarias, cada una de ellas dedicada a diferentes prácticas, pasantías y proyectos relacionados con la producción agropecuaria. A través de este enfoque práctico, se busca no solo formar profesionales en el sector agroindustrial, sino también fomentar una cultura de respeto y protección del medio ambiente (Henao Sarmiento et al., 2007). Es fundamental que las prácticas formativas en estas unidades, incluyendo la producción porcina, incorporen conceptos de sostenibilidad ambiental para contribuir tanto al desarrollo agroindustrial como a la preservación de los recursos naturales del entorno.

El manejo adecuado de los residuos orgánicos y líquidos generados por la producción porcina se ha convertido en un desafío clave dentro de las unidades productivas agropecuarias. La falta de un sistema eficiente para el tratamiento de estos residuos puede generar impactos negativos sobre el medio ambiente, afectando la calidad del agua, el suelo y el aire. La degradación de los recursos naturales, como la alteración de las coberturas protectoras en microcuencas y la contaminación de fuentes hídricas, es un problema creciente en muchas zonas rurales del país. Esto subraya la importancia de implementar soluciones de manejo de residuos que no solo minimicen los efectos adversos de la producción porcina, sino que también promuevan prácticas de preservación ambiental, mejorando la calidad del agua, suelo y aire, y contribuyendo a la sostenibilidad del medio rural.

Los residuos generados por las unidades porcinas, como el estiércol y las aguas residuales, son compuestos altamente biodegradables. Diversos estudios, como el

de Andreadakis (1992) y Deng et al. (2008), han demostrado que el estiércol de cerdo es una excelente fuente de nutrientes para procesos biológicos, como la digestión anaerobia, debido a su capacidad amortiguadora y a su contenido nutricional. Sin embargo, estos residuos también tienen el potencial de generar efectos contaminantes si no son tratados adecuadamente. El estiércol porcino puede elevar la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), lo que refleja su capacidad para contribuir a la contaminación del agua y el aire. Este proyecto tiene como objetivo aprovechar estas características de los residuos para desarrollar un sistema eficiente de manejo, buscando mitigar los efectos contaminantes y aprovechar los subproductos generados, como fertilizantes para la agricultura y biogás para la producción de energía (Pérez-Pérez et al., 2016).

Además, la transformación de residuos en recursos útiles, como fertilizantes orgánicos, es una estrategia que contribuye al cierre de ciclos productivos dentro del mismo sistema agroindustrial. Al reutilizar los residuos generados por la producción porcina, se reduce la dependencia de productos químicos externos, al mismo tiempo que se optimiza la productividad agrícola del centro de formación. Implementar un modelo integral de manejo de residuos no solo mejorará las condiciones ambientales del centro, sino que también permitirá a los estudiantes experimentar de primera mano el uso de tecnologías limpias y métodos innovadores para el tratamiento de desechos, lo que enriquecerá su formación profesional.

El deterioro de los recursos naturales, especialmente en áreas de recarga de acuíferos y en microcuencas críticas para el abastecimiento de agua, constituye un riesgo que afecta tanto a la biodiversidad como a las actividades productivas locales. El manejo inadecuado de los residuos porcinos puede exacerbar estos problemas, aumentando la contaminación y la presión sobre los recursos hídricos. Por lo tanto, la necesidad de implementar un sistema integral de manejo de residuos en el Centro de Formación Agroindustrial La Angostura se justifica no solo en términos ambientales, sino también en términos de salud pública. Los residuos sin

tratar pueden causar contaminación en las fuentes de agua cercanas, lo que puede tener consecuencias perjudiciales para las comunidades y ecosistemas locales.

La propuesta de este sistema integral de manejo de residuos en la unidad porcina tiene la capacidad de reducir la contaminación ambiental y promover prácticas responsables en el manejo de los desechos, optimizando el uso de los recursos disponibles. Esta propuesta no solo tiene un impacto directo sobre la unidad porcina, sino que también se puede convertir en un modelo replicable para otras unidades productivas en la región, contribuyendo así al desarrollo de la agroindustria sostenible en el Huila y otras regiones productivas del país. A medida que las unidades productivas adoptan estos modelos, se fomenta un cambio cultural hacia la sostenibilidad, integrando en la formación académica los principios de gestión responsable de residuos y producción limpia (Martínez-Lozano, 2015).

La educación en sostenibilidad ambiental es otro aspecto clave de este proyecto. Al integrar el manejo de residuos en las actividades prácticas de los estudiantes, el centro ofrece una experiencia formativa completa, en la que los futuros profesionales pueden aplicar conocimientos técnicos y científicos para resolver problemas reales de gestión ambiental. Esto no solo les proporciona una capacitación técnica, sino que también promueve la responsabilidad social y ambiental como un componente esencial de su desarrollo profesional. Además, al implementar estas soluciones, el Centro de Formación Agroindustrial La Angostura podrá consolidarse como un referente en la formación de profesionales comprometidos con la sostenibilidad en el sector agroindustrial (Álvarez Valencia et al., 2019).

Por último, la adopción de un sistema eficiente de manejo de residuos no solo mejorará las condiciones ambientales del centro y sus alrededores, sino que también fortalecerá la competitividad del sector agroindustrial en la región. La implementación de prácticas sostenibles contribuirá a mejorar la imagen

institucional del centro, promoviendo su rol como líder en la formación de profesionales con un enfoque práctico en la solución de problemas ambientales. Esto, a su vez, podrá generar una mayor atracción para la colaboración con otras instituciones, organismos gubernamentales y el sector privado, abriendo nuevas oportunidades de desarrollo e innovación en el área agroindustrial.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general

Diseño de un plan Manejo integral de residuos de la unidad Porcina del Centro de Formación Agroindustrial La Angostura, Campoalegre Huila.

4.2. Objetivos específicos

Diagnosticar el sistema de manejo de residuos en la unidad porcícola del Centro de Formación Agroindustrial La Angostura, Campoalegre Huila

Establecer los lineamientos de manejo de residuos sólidos de la unidad Porcina del Centro de Formación Agroindustrial La Angostura, Campoalegre Huila

Proponer un sistema de manejo de residuos sólidos de la unidad Porcina del Centro de Formación Agroindustrial La Angostura, Campoalegre Huila

5. MARCO TEÓRICO

El desarrollo de un sistema de manejo integral de residuos en unidades porcinas es un componente esencial para la comprensión del contexto ambiental, técnico y normativo en el cual se llevará a cabo la investigación. Este marco proporciona los fundamentos científicos y teóricos que guiarán la elaboración del proyecto, así como la base para la selección de metodologías y tecnologías a utilizar en el tratamiento y aprovechamiento de los residuos generados por la unidad porcina del Centro de Formación Agroindustrial La Angostura. A través de una revisión extensa de los conceptos clave, tecnologías y normativas aplicables, este marco establece las directrices necesarias para alcanzar una gestión de residuos eficaz, eficiente y alineada con los objetivos de sostenibilidad.

La actividad agrícola, la deforestación y otros usos del suelo son responsables de aproximadamente el 25% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) relacionadas con las actividades humanas (FAO, 2019). En particular, la producción porcina contribuye significativamente al cambio climático debido a la emisión de gases de efecto invernadero, como metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). El metano generado durante los procesos fermentativos en el sistema digestivo de los cerdos tiene un potencial de calentamiento global mucho mayor que el del CO_2 , lo que subraya la necesidad urgente de adoptar estrategias para mitigar estas emisiones en las unidades porcinas (Pérez et al., 2017).

La gestión de residuos, especialmente el estiércol y las aguas residuales generadas por las unidades porcinas, es esencial para evitar la contaminación del agua y el aire, así como la proliferación de microorganismos patógenos. Estos residuos pueden generar problemas de salud pública y alterar la biodiversidad local. Por ello, el diseño e implementación de un sistema de manejo integral de residuos en el Centro de Formación Agroindustrial La Angostura contribuirá no solo a la sostenibilidad del centro, sino también al bienestar ambiental de la región.

El Departamento del Huila, conocido por su liderazgo en la producción de café, se enfrenta a desafíos significativos en cuanto a la gestión de recursos naturales, especialmente el agua. La Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena (CAM) es la entidad encargada de velar por la protección y conservación de los recursos naturales en el Huila, promoviendo el desarrollo sostenible de la región. En este contexto, el Centro de Formación Agroindustrial La Angostura juega un papel clave al ser uno de los centros agropecuarios más influyentes del sur de Colombia, enfocándose en el desarrollo agropecuario y la transformación de materias primas. Es imperativo que este centro implemente un plan de manejo ambiental que minimice los impactos sobre los sistemas físico-bióticos y el ambiente (CAM, 2020).

La gestión integral de residuos es un enfoque que se refiere a un conjunto de actividades destinadas a reducir, reutilizar y valorizar los residuos generados por la producción. Este proceso considera factores como las características de los residuos, su volumen, la procedencia, los costos de tratamiento y la posibilidad de aprovechamiento energético. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2014), el manejo adecuado de los residuos sólidos y líquidos generados en unidades porcinas contribuye significativamente a la sostenibilidad ambiental, mejorando la calidad de los recursos hídricos y del suelo, y reduciendo las emisiones de gases contaminantes.

La materia orgánica presente en el agua, derivada de los residuos de la producción porcina, es una de las principales causas de la contaminación acuática. El oxígeno es esencial para la vida acuática, y cuando se introducen compuestos que necesitan oxígeno para su descomposición, se genera una demanda de oxígeno superior a los niveles disponibles en el agua. Esto provoca una deficiencia de oxígeno disuelto, lo que afecta negativamente a la fauna acuática y compromete la calidad del agua. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2014), la descomposición de materia orgánica en cuerpos de agua también contribuye al aumento de patógenos acuáticos, lo que puede generar riesgos para la salud pública y la biodiversidad.

El manejo incorrecto de los residuos sólidos de la unidad porcina también puede alterar el equilibrio del suelo. El vertido indiscriminado de estiércol puede obstruir los poros del suelo, afectando la capacidad de drenaje y la retención de agua. Este fenómeno, conocido como colmatación del suelo, reduce la fertilidad del terreno y puede contribuir al deterioro de los ecosistemas circundantes. En cuanto a la calidad del aire, las actividades ganaderas, incluida la producción porcina, son responsables de la emisión de gases como amoníaco (NH_3) y metano (CH_4), que no solo afectan la atmósfera, sino que también contribuyen al cambio climático y la destrucción de la capa de ozono (FAO, 2019).

El aprovechamiento de los residuos generados en la unidad porcina tiene un gran potencial para promover la agricultura sostenible. El estiércol y otros residuos orgánicos pueden ser utilizados como fertilizantes naturales, lo que reduce la dependencia de fertilizantes químicos y mejora la salud del suelo. La utilización de estos subproductos en la agricultura permite no solo mejorar la producción de cultivos, sino también fijar mayores cantidades de CO_2 en el suelo, contribuyendo a la reducción del efecto invernadero. Según estudios recientes, la recuperación de suelos mediante la fertilización orgánica y la implementación de prácticas agrícolas sostenibles puede ayudar a mitigar los efectos del cambio climático (Pérez et al., 2017).

El diseño de un sistema integral de manejo de residuos en la unidad porcina del Centro de Formación Agroindustrial La Angostura debe considerar tanto la valoración energética como el aprovechamiento agrícola de los residuos generados. Esto contribuirá a la minimización de los impactos ambientales y a la mejora de la calidad de vida de las comunidades locales, permitiendo que el centro sirva como un proyecto piloto para otras unidades productivas en la región. A través de la implementación de tecnologías como la digestión anaerobia, el compostaje y los humedales artificiales, el centro podrá alcanzar sus objetivos de sostenibilidad ambiental y responsabilidad social.

5.1.1. Fundamentos teóricos

El concepto de producción limpia, un enfoque integral que busca optimizar los procesos productivos de manera que se reduzcan los residuos y la contaminación, minimizando el impacto ambiental de las actividades agroindustriales. La producción limpia implica la utilización de tecnologías más eficientes, el tratamiento adecuado de los residuos generados, y la integración de prácticas de sostenibilidad que promuevan la protección del medio ambiente sin comprometer la competitividad de las empresas productivas (Cayuela et al., 2015). Este enfoque es clave en el contexto de la producción porcina, donde los residuos orgánicos, como el estiércol y las aguas residuales, requieren ser gestionados de manera que no generen efectos negativos sobre el entorno.

La sostenibilidad ambiental en el sector agropecuario, y específicamente en la producción porcina, involucra la integración de soluciones que permitan la reducción de la contaminación, la reutilización de los residuos y la preservación de los recursos naturales. Las actividades relacionadas con la ganadería porcina, como el manejo de los estiércoles y las aguas residuales, son responsables de la emisión de gases contaminantes y de la contaminación de los cuerpos de agua, lo que subraya la necesidad de adoptar modelos de producción que minimicen estos impactos (González-Fernández et al., 2011). Para ello, es necesario implementar un sistema de manejo de residuos que permita la transformación de los subproductos generados en recursos aprovechables, como el biogás, los fertilizantes orgánicos, y otros productos útiles en la agricultura o la producción energética.

Los residuos sólidos y líquidos generados por la producción porcina son una de las principales fuentes de contaminación ambiental en las unidades de producción. El estiércol porcino es un subproducto altamente orgánico, compuesto principalmente por materia orgánica biodegradable. Si bien el estiércol es valioso como fertilizante o sustrato para la producción de biogás, cuando se maneja de forma inadecuada, puede generar efectos negativos en la calidad del agua y el suelo, a través de la

liberación de nutrientes en forma de nitrógeno y fósforo que favorecen la eutrofización de cuerpos de agua cercanos. Además, las aguas residuales porcinas contienen alta demanda bioquímica de oxígeno (DBO), lo que refleja la carga contaminante de estos desechos (Andreadakis, 1992). Por ello, según Acevedo (2006), menciona que es imprescindible implementar tecnologías que no solo gestionen estos residuos, sino que también mitiguen sus efectos negativos, transformándolos en recursos útiles.

Tecnologías disponibles para el manejo de residuos porcinos

Existen diversas tecnologías que han demostrado ser eficaces para el tratamiento de los residuos porcinos, principalmente el estiércol y las aguas residuales. Entre ellas, se destacan la digestión anaerobia, el compostaje y los humedales artificiales, todas con el potencial de reducir el impacto ambiental de las unidades porcinas y permitir la reutilización de los residuos.

La digestión anaerobia es una de las tecnologías más empleadas en la gestión de residuos orgánicos en unidades porcinas (Álvarez, Caneta y Moyano, sf), ya que permite la conversión de los residuos orgánicos, como el estiércol, en biogás, un recurso energético renovable. La digestión anaerobia es un proceso biológico en el que los microorganismos descomponen la materia orgánica en ausencia de oxígeno, generando metano (CH_4), que puede ser utilizado para la producción de energía. Este proceso no solo reduce el volumen de los residuos, sino que también captura el metano, un gas de efecto invernadero que, de otro modo, contribuiría al calentamiento global (Franco et al., 2018). Además, el proceso de digestión anaerobia produce un digestato, que es un material estabilizado que puede ser utilizado como fertilizante orgánico, cerrando el ciclo de nutrientes dentro de la unidad productiva.

El compostaje es otro proceso eficaz para el tratamiento del estiércol Aguilar y Botero (2006). En este proceso, los residuos orgánicos se descomponen mediante la acción de microorganismos aeróbicos, produciendo compost, un fertilizante

orgánico de alta calidad que puede ser utilizado en la agricultura para mejorar la calidad del suelo. El compostaje no solo reduce los residuos, sino que también transforma la materia orgánica en un producto estable y seguro, que puede ser utilizado de manera beneficiosa para los cultivos (González-Fernández et al., 2011). Esta tecnología es relativamente económica y fácil de implementar en unidades de producción de pequeña y mediana escala, como la unidad porcina del Centro de Formación Agroindustrial La Angostura.

Los humedales artificiales son sistemas de tratamiento de aguas residuales que utilizan plantas acuáticas para filtrar y absorber los contaminantes presentes en las aguas residuales. Este sistema, que es relativamente barato de implementar, ha demostrado ser eficaz en la reducción de nutrientes y contaminantes en las aguas residuales de unidades agroindustriales. Según Jordán et al. (2015), los humedales artificiales ofrecen una solución ecológica y económica para tratar las aguas residuales generadas por actividades agropecuarias, como la producción porcina. Al utilizar este sistema, se pueden tratar grandes volúmenes de agua de manera eficiente, minimizando los impactos negativos sobre los cuerpos de agua cercanos.

El concepto de economía circular es particularmente relevante en el contexto de la gestión de residuos porcinos. Este modelo promueve la reutilización de los residuos generados por las actividades productivas para crear nuevos recursos o productos, cerrando el ciclo de materiales dentro del sistema productivo. En la producción porcina, esto implica la conversión de residuos como el estiércol y las aguas residuales en productos útiles, como biogás, fertilizantes orgánicos, o incluso alimentos para animales (Franco et al., 2018). La adopción de un modelo de economía circular en las unidades porcinas contribuye no solo a la reducción de los impactos ambientales, sino también a la eficiencia económica de la unidad productiva, al generar productos que pueden ser utilizados internamente, reduciendo la necesidad de insumos externos y promoviendo la autosuficiencia.

El marco teórico de este proyecto proporciona una base sólida para el desarrollo de un sistema integral de manejo de residuos en la unidad porcina del Centro de Formación Agroindustrial La Angostura. A través del análisis de los conceptos de producción limpia, sostenibilidad ambiental, economía circular, y las tecnologías disponibles para el tratamiento de residuos, así como las normativas legales pertinentes, se establece el contexto necesario para el diseño y la implementación de un sistema que no solo cumpla con las regulaciones, sino que también promueva prácticas sostenibles y eficientes dentro de la unidad productiva. La integración de estos enfoques contribuirá a mejorar la gestión de los residuos, cerrar los ciclos de nutrientes y energía, y minimizar los impactos ambientales generados por la producción porcina.

5.1.2. Marco legal

En Colombia, la gestión de residuos en las unidades agroindustriales, incluida la producción porcina, está regulada por una serie de normas y leyes que buscan proteger el medio ambiente y garantizar la sostenibilidad de las actividades productivas. La Ley 99 de 1993, que establece el marco para la política ambiental en Colombia, tiene un enfoque en la prevención de la contaminación y la sostenibilidad en todas las actividades productivas. Esta ley establece los principios básicos que deben seguir las unidades productivas, promoviendo prácticas que minimicen los efectos contaminantes de los residuos y fomenten su tratamiento adecuado.

La Resolución 631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible establece los lineamientos técnicos para la gestión de los residuos sólidos en las unidades productivas. Esta resolución es especialmente relevante para las granjas porcinas, ya que regula cómo deben ser manejados los residuos generados por estas unidades, exigiendo la implementación de tecnologías que aseguren la correcta disposición y tratamiento de los residuos, y minimicen los impactos sobre el medio ambiente. La resolución también establece que las unidades productivas

deben contar con un sistema de gestión de residuos que cumpla con los criterios técnicos y ambientales establecidos por las autoridades competentes.

Tabla 1: Marco Legal.

Norma	Entidad	Observaciones
Ley 99 de 1993	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo	Establece los principios de la política ambiental en Colombia, incluyendo la prevención de la contaminación y el uso sostenible de los recursos naturales. Regula la gestión de residuos en diversas actividades productivas, incluyendo la agroindustria.
Resolución 631 de 2015	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Regula el manejo de residuos sólidos generados por actividades agroindustriales, incluidos los derivados de la producción porcina. Establece las normas técnicas y ambientales para la gestión de los residuos, promoviendo prácticas de manejo adecuado.
Decreto 1076 de 2015	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo	Establece el régimen de gestión de residuos líquidos provenientes de actividades agropecuarias, regulando las prácticas de tratamiento y disposición segura de aguas residuales en unidades productivas.
Ley 1152 de 2007	Congreso de la República de Colombia	Regula la gestión de residuos peligrosos y no peligrosos generados por la industria. En el contexto de la producción porcina, establece lineamientos para el manejo adecuado de residuos orgánicos y líquidos, especialmente aquellos con alto contenido de nutrientes.
Resolución 1407 de 2008	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo	Regula la gestión de aguas residuales generadas por actividades agroindustriales, incluyendo la producción de cerdos, promoviendo el uso de tecnologías adecuadas para su tratamiento y la disposición correcta en cuerpos de agua.
Ley 1333 de 2009	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo	Regula las sanciones por el manejo inadecuado de residuos y las violaciones a las normativas ambientales. Es fundamental en la aplicación de penalizaciones a las unidades productivas que no cumplan con las regulaciones de gestión de residuos.

Fuente: El autor

6. DISEÑO METODOLÓGICO

El diseño metodológico de esta investigación se organiza en tres fases, con el objetivo de desarrollar e implementar un sistema de manejo integral de residuos en la unidad porcina del Centro de Formación Agroindustrial La Angostura. Este enfoque busca minimizar los impactos negativos sobre el medio ambiente, específicamente en lo que respecta a la contaminación del agua, aire y suelo. A continuación, se detallan las fases de la investigación.



Figura 1: Metodología propuesta

Fase 1: Diagnóstico de la Unidad Porcina

El diagnóstico inicial de la unidad porcina será realizado mediante una combinación de métodos cualitativos y cuantitativos. Para la inspección visual y documental, se utilizarán criterios preestablecidos basados en metodologías estándar de gestión ambiental, como las normas ISO 14001 para la gestión ambiental (ISO, 2015). La inspección visual incluirá una revisión exhaustiva de las instalaciones, almacenamiento de residuos, y la identificación de áreas de riesgo de contaminación. Para la revisión documental, se analizarán los registros históricos relacionados con el manejo de residuos, incluyendo las prácticas previas de

disposición, tratamiento y almacenamiento. Esto se complementará con la evaluación de los registros de residuos sólidos y líquidos que permitan identificar las fuentes y flujos de los residuos en la unidad porcina.

Esta fase se desarrolló mediante la evaluación física de las áreas relevantes para la gestión de residuos, como la Piara (área de alojamiento de los cerdos) y las zonas de manejo de residuos orgánicos y líquidos, como los sistemas de recolección de aguas residuales y el tratamiento de estiércol.

Proceso:

- ✓ Evaluación de instalaciones clave
- ✓ Observación del manejo de residuos líquidos
- ✓ Inspección de sistemas de almacenamiento de agua residual
- ✓ Observación de características del agua residual

Herramientas utilizadas:

- ✓ Lista de verificación
- ✓ Fotografías

Inspección Documental

La inspección documental complementa la inspección visual, proporcionando información sobre las prácticas de manejo de residuos que no son directamente observables. Durante esta fase, se revisan los registros y los informes de monitoreo ambiental existentes, así como cualquier documentación relacionada con el manejo de residuos y el cumplimiento de la normativa ambiental.

Proceso:

- ✓ Revisión de registros de manejo de residuos
- ✓ Evaluación de la normativa

Herramientas utilizadas:

- ✓ Documentos oficiales
- ✓ Entrevistas o encuestas

Los métodos utilizados para medir los aspectos observados incluyen:

- ✓ Muestreo visual: Observación directa de los residuos generados y el estado de las instalaciones.
- ✓ Revisión documental: Verificación de los registros y documentos disponibles que describen las prácticas operativas y el cumplimiento de la normativa.
- ✓ Análisis de calidad del agua y residuos sólidos: Se realizan análisis en el laboratorio para determinar la presencia de contaminantes en las muestras de agua y residuos, como materia orgánica, coliformes fecales, metales pesados, entre otros.

Los métodos de muestreo representativos que permiten evaluar la composición química y microbiológica de los residuos. De acuerdo con López y Vargas (2019), el muestreo de agua residual debe seguir los procedimientos establecidos por la Norma Técnica Colombiana NTC 5160, garantizando que las muestras sean representativas del punto de muestreo. (González et al., 2020). donde se aplicaran técnicas de laboratorio estandarizadas. Para el análisis de agua, se seguirán los métodos de análisis del agua recomendados por la EPA (Environmental Protection Agency), que incluyen la medición de parámetros como el pH, la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), la demanda química de oxígeno (DQO), y la concentración de nitrógeno y fósforo (EPA, 2020). Estos parámetros son fundamentales para evaluar el nivel de contaminación por lixiviados de estiércol y residuos generados en la unidad. Además, para los residuos sólidos, se utilizará un análisis gravimétrico para determinar la cantidad de residuos sólidos generados y

su composición. Estos datos serán claves para identificar el impacto potencial sobre la calidad del agua, el aire y el suelo de la zona circundante.

El muestreo de agua se realiza de acuerdo con métodos estandarizados para garantizar que los resultados obtenidos sean representativos, precisos y comparables con los criterios de calidad establecidos. Esta metodología sigue una serie de pasos que incluyen la selección de los puntos de muestreo, el procedimiento para la toma de muestras, el transporte y la conservación de las muestras, así como el análisis de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos del agua.

1. Selección de puntos de muestreo: Se deben identificar los puntos estratégicos de muestreo en las instalaciones de la unidad porcina y sus alrededores
2. Método de toma de muestras:
 - Frecuencia de muestreo: Única Vez
 - Técnica de toma: El muestreo de agua debe realizarse utilizando frascos estériles para evitar la contaminación. La Norma Técnica Colombiana NTC 5160 proporciona directrices sobre el volumen de muestra necesario, generalmente entre 1 a 2 litros de agua por punto, dependiendo del tipo de análisis
3. Conservación y transporte de las muestras: Las muestras deben ser conservadas en temperaturas controladas (entre 2 y 4°C) inmediatamente después de su recolección para evitar alteraciones de los parámetros analizados.
4. Análisis de los parámetros de calidad del agua: Los análisis deben cubrir una gama de parámetros, tanto físicos como químicos y microbiológicos, que permitan evaluar el estado de la calidad del agua y los posibles riesgos asociados

5. Interpretación de los resultados: Los resultados obtenidos de los análisis deben ser comparados con los límites establecidos por las normativas ambientales

Para la evaluación de impacto ambiental se empleó la metodología de Conesa, siendo esta una herramienta estructurada que se utiliza para la evaluación de impactos ambientales derivados de actividades humanas. Su principal propósito es identificar, predecir, evaluar y mitigar los efectos adversos que un proyecto o actividad pueda tener sobre el medio ambiente. las variables que mide, los datos requeridos y los criterios utilizados:

a) Variables Abióticas:

Calidad del aire: Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), como metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂), derivados de la descomposición del estiércol y lo relacionado con la generación de olores.

Calidad del agua: Contaminación de fuentes hídricas por lixiviados del estiércol y otros residuos, la concentración de metales pesados, nutrientes (nitrógeno, fósforo), y coliformes fecales y en algunos casos la evaluación de la eutrofización de cuerpos de agua cercanos.

Características del suelo: Acidificación del suelo, acumulación de metales pesados y nutrientes como nitrógeno y fósforo y la colmatación y compactación del suelo por acumulación de residuos orgánicos.

b) Variables Bióticas

Flora: Alteración de la cobertura vegetal debido al desplazamiento de especies o la contaminación.

Fauna: Desplazamiento de fauna debido a la alteración del hábitat, la propagación de vectores de enfermedades (por ejemplo, mosquitos) como consecuencia de residuos y olores.

c) Variables Socioeconómicas

Aspectos económicos: Evaluación de los beneficios económicos derivados del manejo eficiente de residuos, como la generación de biogás y la creación de empleo además del potencial de mejora de la calidad de los productos agropecuarios mediante el tratamiento adecuado de los residuos.

Para realizar una evaluación de impacto ambiental utilizando la metodología CONESA, se requieren varios datos de entrada, que son fundamentales para realizar una estimación precisa de los impactos. Algunos de los principales datos de entrada incluyen:

Datos sobre el proyecto o actividad: Descripción detallada de la unidad productiva (por ejemplo, la unidad porcina: número de animales, tipo de alimentación, área de producción, etc.), técnicas de manejo de residuos utilizadas (compostaje, biodigestores, tratamiento de aguas, etc.). y la localización geográfica del proyecto. Tipo, cantidad y composición de los residuos sólidos y líquidos generados (estiércol, aguas residuales, residuos sólidos no biodegradables), mediciones previas de calidad del aire, agua y suelo en la zona circundante, información sobre la biodiversidad local (flora, fauna) y los recursos naturales cercanos. Información sobre la población local, su salud y las actividades económicas principales de la región y los datos sobre la infraestructura existente y su capacidad para manejar los impactos del proyecto.

La metodología CONESA utiliza los siguientes criterios para evaluar los impactos ambientales:

- ✓ **Intensidad del impacto**
- ✓ **Extensión del impacto**
- ✓ **Duración y frecuencia del impacto**

- ✓ **Reversibilidad del impacto**
- ✓ **Recuperación**

Posterior a ello se realiza el procedimiento para la Evaluación, donde lo primero es revisar todos los elementos del proyecto (por ejemplo, residuos generados) y su posible interacción con el medio ambiente, seguido la clasificación de los impactos según su intensidad, extensión, y duración usando los criterios mencionado, la cuantificación donde se utilizan técnicas de medición para cuantificar los impactos sobre el agua, aire, suelo y biodiversidad, y con base en ello se adelanta la formulación de medidas correctivas y preventivas, para proponer soluciones basadas en la reducción de residuos, la mejora de tecnologías de tratamiento, y la implementación de procesos de recuperación.

Fase 2: Diseño del Plan de Manejo Integral de Residuos

En esta fase, se elaborará un plan de manejo integral de residuos que abarcará la reducción, reutilización, y disposición adecuada de los residuos generados. Para ello, se seleccionarán tecnologías apropiadas, tales como la digestión anaeróbica, el compostaje y los humedales artificiales. La digestión anaeróbica será evaluada basándose en investigaciones previas, como las de Cepero et al. (2012), quienes destacan la eficiencia de estos sistemas en el tratamiento de residuos orgánicos como el estiércol. Además, se seleccionarán tecnologías adecuadas a las características de la unidad, como el biodigestor tubular mencionado por Arias et al. (2015), que es de bajo costo, fácil instalación y adecuado para granjas porcinas de tamaño medio.

El diseño del sistema incluirá un análisis de viabilidad técnica y económica para cada tecnología seleccionada, siguiendo los lineamientos de evaluación de tecnologías ambientales de la EPA (2018) y la UNEP (2014), con el fin de determinar la factibilidad de su implementación en la unidad. Este análisis considerará el costo

inicial de instalación, el mantenimiento a largo plazo y los beneficios ambientales generados. Además, se desarrollarán procedimientos operativos estándar (SOP) para cada tipo de residuo, lo que garantizará una implementación coherente y sistemática del sistema de manejo de residuos.

Se debe identificar y clasificar los diferentes tipos de residuos generados por la unidad porcina, como estiércol, aguas residuales y residuos sólidos (restos de comida, empaques, plásticos, etc.). Para cada tipo de residuo, se debe determinar su composición, volumen diario y los potenciales impactos ambientales asociados., a partir de ello se construye cada ficha ambiental donde se define los objetivos que se buscan alcanzar con las medidas de manejo, así como las metas específicas a corto, mediano y largo plazo.

Criterios:

- ✓ Reducción de residuos: Establecer un porcentaje de reducción de residuos a tratar en el primer año.
- ✓ Generación de biogás: Calcular la cantidad estimada de biogás que se puede generar a partir de los residuos orgánicos.
- ✓ Mejora en la calidad ambiental: Establecer metas para la mejora de la calidad del aire, agua y suelo, como la reducción de emisiones de metano y la mejora de la calidad del agua en los cuerpos cercanos.

Para cada tipo de residuo y cada impacto ambiental identificado, se deben establecer medidas correctivas y preventivas. Estas medidas deben especificar las tecnologías a implementar, los procedimientos operativos, los recursos necesarios y las responsabilidades de los encargados. El cronograma debe incluir todas las actividades necesarias para la implementación de las medidas de manejo, con fechas y responsables asignados. Además, se debe establecer una frecuencia de monitoreo para evaluar el desempeño de las medidas implementadas.

Se deben establecer indicadores clave de rendimiento (KPI) para medir la eficacia de las medidas de manejo implementadas. Estos indicadores deben ser específicos, medibles, alcanzables, relevantes y limitados en el tiempo. Medición diaria de la cantidad de biogás producido por el sistema de biodigestión anaeróbica, porcentaje de reducción de residuos orgánicos a través del compostaje y monitoreo de la calidad del aire, agua y suelo en la zona circundante, utilizando los parámetros establecidos en la normativa ambiental.

El Diseño del Plan de Manejo Integral de Residuos debe basarse en una combinación de la metodología de Conesa para la evaluación de impactos ambientales y los criterios técnicos y económicos de cada tecnología de tratamiento seleccionada. Los pasos de este diseño deben asegurar que el manejo de residuos sea eficiente, sostenible y compatible con las normativas ambientales nacionales e internacionales.

Fase 3: Implementación y Evaluación del Sistema de Manejo de Residuos

La implementación del sistema de manejo de residuos se llevará a cabo tras la capacitación del personal en prácticas sostenibles y tecnologías de manejo de residuos. La capacitación será realizada utilizando las mejores prácticas y protocolos internacionales como los establecidos en el Manual de Buenas Prácticas de Gestión de Residuos de la FAO (2016), con énfasis en la reducción de impactos ambientales. Además, se implementarán talleres educativos basados en teorías de educación ambiental, que ayudarán a los operarios a comprender la importancia de su rol en la protección del medio ambiente y a aplicar los protocolos establecidos.

El diseño de la digestión anaeróbica como la tecnología principal debido a su efectividad comprobada en la conversión de residuos orgánicos en biogás. Este proceso no solo permite la reducción de los residuos generados, sino que también contribuye a la generación de biogás, el cual puede ser utilizado como fuente de

energía para la granja, disminuyendo así la dependencia de combustibles fósiles. El biodigestor tubular fue elegido por su bajo costo, facilidad de instalación y mantenimiento, y su adecuado rendimiento en entornos rurales como el de la unidad porcina. Además, se diseñó un sistema de monitoreo continuo para asegurar la correcta operación del sistema, con indicadores clave como la producción de biogás y la calidad del agua residual.

Se determinó el cálculo del volumen necesario para el biodigestor basándose en la cantidad de estiércol y agua de lavado generados en la granja. Se determinó un tiempo de retención hidráulico (TRH) de 35 días, lo que asegura que el residuo orgánico permanezca en el biodigestor el tiempo suficiente para su descomposición y producción de biogás. La biomasa generada por cada tipo de animal (lechones, hembras, sementales) se calculó tomando en cuenta su peso y la cantidad de excremento diario generado. El volumen total del biodigestor se calculó multiplicando el volumen de residuos por el TRH, lo que permitió establecer el tamaño óptimo del sistema.

El biodigestor fue diseñado para garantizar un proceso eficiente de digestión anaeróbica. Se utilizó un sistema de doble bolsa de plástico o polietileno, lo que proporcionó una estructura flexible capaz de adaptarse a las variaciones térmicas y a las condiciones locales. Se incluyeron válvulas de seguridad para la salida de gas, un sistema de trampa de agua condensada y filtros para evitar posibles obstrucciones. Además, se consideraron aspectos ambientales y operativos como la ubicación adecuada para evitar la contaminación de fuentes de agua cercanas y la optimización del uso de recursos naturales. El control de temperatura dentro del biodigestor se gestionó para operar dentro del rango mesofílico (30-42°C), que es el más adecuado para la digestión anaeróbica eficiente.

En la fase de implementación, se capacitó al personal de la unidad en el manejo adecuado de los residuos y en la operación del biodigestor, enfatizando la importancia de la reducción de impactos negativos sobre el medio ambiente, especialmente la contaminación del agua, el aire y el suelo. La instalación de los biodigestores se realizó de acuerdo con los lineamientos establecidos en la fase de diseño, con énfasis en garantizar su eficiencia operativa y el cumplimiento de los estándares ambientales locales. Para optimizar la producción de biogás, se controlaron factores clave como la relación carbono-nitrógeno (C/N), la temperatura y el pH dentro del biodigestor.

7. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1. Fase 1: Diagnóstico de la Unidad Porcina

En esta fase, se realizó un diagnóstico exhaustivo sobre la situación actual del manejo de residuos sólidos y líquidos en la unidad porcina del Centro de Formación Agroindustrial La Angostura, con el objetivo de evaluar la generación de residuos y sus efectos sobre el medio ambiente.

Inspección Visual y Documental

Durante la inspección visual, se observó que las instalaciones de la unidad porcina, incluyendo la Piara (área de alojamiento de cerdos), presentan condiciones que requieren mejoras en la gestión de residuos. Se encontró que el agua utilizada en los lavados de los corrales es reciclada, pero no se está realizando un mantenimiento adecuado de las tuberías, lo que afecta la eficiencia del proceso. El agua residual proveniente del lavado de los corrales y de la alimentación de los cerdos se recoge en una caja de concreto sumergida, sin un aforo adecuado para medir el caudal. Este punto de muestreo, denominado La Piara SENA Campo Alegre, presenta un color café oscuro y material flotante, lo que indica la presencia de materia orgánica no tratada adecuadamente (Informe de Monitoreo de Agua Residual, 2020).

Figura 2: Unidad productora porcina.



Fuente: Autor.

Figura 3: Unidades de producción



Fuente: Autor.

En cuanto a los residuos sólidos, la unidad utiliza una compostera para el tratamiento de la porcínaza sólida, sin embargo, las prácticas de manejo de estos residuos aún no son completamente eficientes. El estiércol y otros residuos orgánicos se almacenan en la compostera, pero no se han logrado eliminar de manera óptima los olores ofensivos y la descomposición no se realiza de forma suficientemente controlada, lo que contribuye a la emisión de gases como el metano.

Análisis de los Residuos Generados

El análisis de los residuos generados en la unidad porcina incluyó tanto los residuos líquidos como sólidos. Los residuos líquidos, que provienen de los lavados de los corrales y la alimentación de los cerdos, son dirigidos hacia un sistema de biodigestores. Sin embargo, la efectividad de este sistema no ha sido evaluada adecuadamente, lo que podría estar contribuyendo a la liberación de gases contaminantes. El Informe de Monitoreo de Agua Residual muestra que las muestras de agua tomadas de la Piara SENA Campo Alegre contenían altos niveles

de materia orgánica no tratada, como se evidencia por el color oscuro del agua y la presencia de material flotante.

En cuanto a los residuos sólidos, el estiércol es almacenado en la compostera, pero no se está realizando un tratamiento completo de los residuos generados. La falta de un sistema de ventilación adecuado y un proceso de compostaje controlado está contribuyendo a la emisión de olores ofensivos y gases de efecto invernadero, como el metano. La unidad porcina no ha implementado de manera efectiva tecnologías de compostaje acelerado ni sistemas de biofiltros para la reducción de olores.

Impacto Ambiental de los Residuos

El impacto de los residuos generados por la unidad porcina sobre el medio ambiente es evidente en la calidad del agua, especialmente en los cuerpos de agua cercanos a la unidad, como el Humedal SENA Campo Alegre, que recibe el vertimiento de aguas residuales tratadas. Aunque el agua en este punto es incolora e inolora, no se han detectado trazas de grasas y aceites, lo que sugiere que el proceso de tratamiento es efectivo en términos de eliminación de estos contaminantes. Sin embargo, no se realizó un aforo de caudal debido a las condiciones del sitio de muestreo, lo que dificulta una medición precisa del impacto.

En términos de calidad del aire, la unidad porcina presenta deficiencias en la gestión de olores generados por el estiércol y las aguas residuales. La falta de un sistema de manejo adecuado de estos residuos contribuye a la contaminación del aire y la emisión de gases como el metano. La unidad no cuenta con un sistema de control de olores eficiente, lo que afecta la calidad del aire en la zona circundante.

Cumplimiento con la Normativa Ambiental

Durante la inspección, se verificó el cumplimiento de la normativa ambiental vigente, especialmente en relación con la Resolución 1207 de 2014 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, que establece los parámetros de calidad para las

aguas residuales de actividades agropecuarias. Los resultados de las muestras de agua, tomadas de la Piara y el Humedal, fueron comparados con los valores establecidos en la resolución. En la Piara SENA Campo Alegre, se identificaron algunas inconsistencias con los valores permitidos para parámetros como el Manganeseo y los Coliformes Termotolerantes, lo que indica que el sistema de tratamiento de aguas residuales requiere mejoras para cumplir con la normativa ambiental (Informe de Monitoreo de Agua Residual, 2020).

El muestreo de agua realizado por Anascol S.A.S. el 4 de noviembre de 2020 en los puntos de monitoreo del SENA Sede Campo Alegre, Huila, proporciona una visión detallada de la calidad del agua utilizada en las instalaciones, tanto en el área de la unidad porcina (Piara) como en el humedal cercano. Los resultados obtenidos son esenciales para evaluar el cumplimiento de los criterios de calidad ambiental establecidos en la Resolución 1207 de 2014, emitida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

El punto de monitoreo se encuentra localizado en las instalaciones del SENA, Sede Campo Alegre - Huila; a orilla del humedal cerca al corral de cabras. El agua proviene de desde el tratamiento de la PTAR y adicional a cuerpo lentic (humedal) desde vertimientos internos. La toma de muestra se realizó a orilla del humedal con pastos altos y cercanía a

tubo de descarga de la PTAR. Durante el monitoreo el agua es incoloro, inolora, no hay presencia de trazas de grasas y aceites, ni vectores. No se realiza aforo de caudal por condiciones del sitio de muestreo (tubo sumergido). Luego del agua pasa por la PTAR esta se utiliza para riego.

Figura 4: puntos de monitoreo y tomas de muestra



Fuente: Anascol S.A.S., 2024



Fuente: Anascol S.A.S., 2024

El agua tomada de este punto proviene del lavado y la alimentación de los corrales. La muestra se recogió de una caja de concreto sumergida, sin un mantenimiento adecuado, lo que dificulta realizar un aforo de caudal preciso. Los resultados obtenidos reflejan un agua de color café oscuro, sin olor, pero con una considerable cantidad de material flotante. Estos resultados indican una posible presencia de materia orgánica no tratada adecuadamente.

Los resultados de la calidad física y química del agua muestran que varios parámetros están fuera de los valores permitidos por la normativa. En cuanto a los metales pesados, el aluminio presenta un valor de 0,74 mg/L, que supera el límite permisible de 0,5 mg/L, lo que sugiere que la unidad porcina podría estar contribuyendo a la contaminación de los recursos hídricos con metales. En cuanto al cianuro libre, el valor obtenido fue de <0,4 mg/L, que, aunque dentro de los límites de la normativa, se encuentra cerca del límite permitido de 0,2 mg/L, lo que indica una posible preocupación en cuanto a la acumulación de estos contaminantes.

Tabla 2: Resultados obtenidos del análisis en el Laboratorio y/o en campo y Comparación Normativa.

Variable	Método	Unidades	Fecha de análisis	Resultados		Resolución 1207 de 2014, Art. 7
				40709	40710	Uso Agrícola
ANÁLISIS FISICOQUIMICO						
Aluminio	SM 3030 E SM3111 D	mg Al/L	1/12/2020	<0,500	0,74	5
Arsénico²	SM 3114 B	mg/L	18/11/2020	<0,01	<0,01	0,1
Berilio Total	SM 3030 E SM 3111 D	mg Be/L	27/11/2020	<0,0400	<0,0400	0,1
Boro²	SM 4500-B, B, Curcumina	mg /L	11/11/2020	<0,168	<0,168	0,4
Cadmio Total	S.M 3030 E SM 3111 B	mg Cd/L	24/11/2020	<0,0100	0,01	0,01
Cianuro Libre	SM 4500CN - B. C. D. I	mg CN /L	30/11/2020	<0,400**	<0,400**	0,2
Cobalto	S.M 3030 E SM 3111 B	mg Co/L	20/11/2020	<0,100	<0,100	0,05
Cobre Total	SM 3030 E- SM 3111 B	mg Cu/L	20/11/2020	<0,0200	<0,0200	1
Cloruros	SM 4500 - Cl - B	mg Cl ⁻/L	14/11/2020	11,1	<5,00	300
Cromo Total	SM 3030 E- SM 3111B	mg Cr/L	18/11/2020	<0,0200	<0,0200	0,1
Fenoles Totales	SM 5530 B. D	mg Fenoles/L	12/11/2020	<0,100	<0,100	1,5
Hidrocarburos Totales	NTC 3362 Numeral 4. Método C/ Numeral 7. Método F Modificado.	mg Hidrocarburos/L	13/11/2020	<1,00	<1,00	1
Fluoruros	Método no Normalizado KIT MERCK SPECTROQUANT	mg F⁻ /L	44155	<0,500	<0,500	1
Hierro Total	SM 3030 E SM 3111 B	mg Fe/L	13/11/2020	0,419	0,802	5
Litio²	S.M 3030 E SM 3111B	mg Li/L	9/11/2020 26/11/2020	<0,06	<0,06	2,5
Manganeso Total	SM 3030 E SM 3111 B	mg Mn/L	13/11/2020	<u>0,209</u>	<0,100	0,2
Mercurio Total	SM 3112 B	mg Hg/L	24/11/2020	<0,00100	<0,00100	0,002

Variable	Método	Unidades	Fecha de análisis	Resultados		Resolución 1207 de 2014, Art. 7
				40709	40710	Uso Agrícola
ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO						
Molibdeno Total	SM 3030 E SM3111 D	mg Mo/L	18/11/2020	<0,800**	<0,800**	0,07
Níquel Total	SM 3030 E SM 3111 B	mg Ni/L	21/11/2020	<0,0500	<0,0500	0,2
Nitratos	Brodie. 9na edición 2011	mg NO3-N/L	5/11/2020	<0,500	<0,500	5
Plomo ²	SM 3111 B	mg/L	13/11/2020	<0,100	<0,100	5

Fuente: Anascol S.A.S., 2024

Otro parámetro relevante es el manganeso, que presentó un valor de 0,209 mg/L, superando el valor máximo permitido de 0,2 mg/L. Este excedente podría afectar tanto la calidad del agua como la salud de los ecosistemas acuáticos cercanos. Los coliformes termotolerantes y los enterococos fecales también exceden los límites establecidos, con valores de 111,990 NMP/100mL y 1,6E+5 NMP/100mL respectivamente, superando ampliamente el umbral máximo permitido de 1 NMP/100mL para uso agrícola y riego, lo que indica una preocupación para la salud pública y la seguridad de las personas que usan estos recursos.

Punto de Monitoreo: Humedal SENA Campo Alegre

Por otro lado, el agua proveniente del humedal, que se recoge a orillas de este hasta cerca del corral de cabras y donde se realiza el tratamiento en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), muestra resultados mucho más favorables en comparación con los de la Piara. El agua es incolora, inolora, sin trazas de grasas o aceites, lo que indica que el proceso de tratamiento en la PTAR es eficaz. No obstante, no se realizó el aforo de caudal debido a las condiciones del sitio de muestreo (tubo sumergido).

Figura 5: Puntos de monitoreo y determinación de insitu de cloro



Fuente: Anascol S.A.S., 2020



Fuente: Anascol S.A.S., 2020

El análisis microbiológico en este punto muestra que todos los parámetros cumplen con los valores permisibles, lo que sugiere que el agua tratada en la PTAR es adecuada para su uso en riego de praderas y pastos de corte. Coliformes termotolerantes y enterococos fecales no fueron detectados, lo que demuestra la efectividad del tratamiento microbiológico. Además, no se encontró presencia de protozoos parásitos humanos o salmonella sp, lo que es un indicativo de la seguridad de esta agua para el uso agrícola.

Tabla 3: Resultados de laboratorio en análisis microbiológico

Variable	Método	Unidades	Fecha de análisis	Resultados		Resolución 1207 de 2014,
						Art. 7
				40709	40710	Uso Agrícola
ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO						
Selenio Total	SM3114 B	mg Se/L	29/11/2020	<0,000500	<0,000500	0,02
Sodio Total	SM 3030 E - SM 3111 NaB	mg Na/L	18/11/2020	8,48	8,29	200
Sulfatos	SM 4500-SO ₄ -E	mg SO4-2/L	18/11/2020	<10,0	<10,0	500
Zinc Total	SM 3030 E SM 3111 B	mg Zn/L	20/11/2020	<0,0500	0,069	3
Vanadio Total	SM 3030 E SM 3113 B	mg V/L	27/11/2020	<1,00	<1,00	0,1
Cloro Total ¹	Kit Fotométrico	mg Cl ₂ /L	5/11/2020	0,62	0,7	Menor a 1,0
Conductividad ¹	SM 2510 B	μS/cm	5/11/2020	634	620	1.500,00
pH ¹	SM 4500 H + B	Unidades de pH	5/11/2020	7,3	7,28	6,0 - 9,0

Variable	Método	Unidades	Fecha de análisis	Resultados		Resolución 1207 de 2014,
						Art. 7
				40709	40710	Uso Agrícola
ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO						
Coliformes Termotolerantes ²	Colilert®-18 (Fecal Coliforms)	NMP/100mL	7/11/2020	<u>111990</u>	1100	1,0*E(+5)
Enterococos Fecales ²	SM 9230 B	NMP/100mL	7/11/2020	<u>1,60E+05</u>	2	1,0*E(2)
Protozoos Parásitos Humanos ³	Manual de procedimientos de laboratorio para el diagnóstico de los parásitos intestinales del	Presencia/Ausencia	5/11/2020	Presencia	Presencia	1
Huevos de Helminto ²	OMS 1996	#Hv/200mL	7/11/2020	0	0	1
Salmonella sp ²	SM 9260 B	NMP/100mL	7/11/2020	<1,8	<1,8	1

N/A: NR No Aplica, No registra

Nota: Los resultados indicados como < (menor que) refieren concentraciones inferiores a los límites de cuantificación del método analítico.

¹ Variable medida en campo.

² Variable subcontratada.

³ Variable no acreditada (no aplica para comparación normativa)

*Dado que el límite de cuantificación del método es superior al de la norma, no puede establecerse el cumplimiento normativo.

_Variable que incumple la normatividad.

Artículo 7 de la Resolución 1207 de 2014. Criterios de calidad. Uso agrícola: Reusó en riego de pradera/ pasto de corte.

Los resultados obtenidos en los puntos de monitoreo se comparan con los valores establecidos en el artículo 7 de la Resolución 1207 de 2014, que regula los parámetros de calidad del agua para el uso agrícola. En la Piara SENA Campo Alegre, la mayoría de los parámetros químicos y microbiológicos no cumplen con los valores establecidos en la normativa, especialmente en lo que respecta a los metales pesados, como el manganeso y los coliformes termotolerantes. Esto representa un riesgo para la calidad ambiental y para la salud pública, lo que resalta la necesidad de implementar un plan de manejo de residuos más riguroso y la mejora de los sistemas de tratamiento de aguas residuales en la unidad porcina.

En contraste, el Humedal SENA Campo Alegre cumple con los parámetros de la Resolución 1207 de 2014 en su totalidad. El agua tratada y vertida en el humedal, proveniente de la PTAR, cumple con los límites establecidos para su uso agrícola, especialmente en términos de los coliformes termotolerantes y enterococos fecales, lo que demuestra la efectividad del proceso de tratamiento en la PTAR.

Además, se realizó un análisis exhaustivo de los residuos generados en la unidad porcina. Este análisis incluyó la identificación y cuantificación de los tipos de residuos presentes, tales como el estiércol, las aguas residuales y los residuos sólidos. Se procedió a caracterizar cada tipo de residuo, evaluando su contenido orgánico, los nutrientes presentes y la cantidad de residuos generados. Se utilizaron métodos de recolección de muestras de los diferentes puntos de la unidad porcina, tanto de los corrales como de los sistemas de almacenamiento de estiércol, así como de las aguas residuales derivadas de los procesos de limpieza y alimentación.

Datos de Residuos Generados en la Unidad Porcina

Estiércol:

En cuanto a la cantidad generada, se estima que por cada cerdo en ciclo de producción se generan aproximadamente entre 0.5 a 1 kg de estiércol por día. En una unidad porcina que maneja 1,000 cerdos, esto equivale a entre 500 a 1,000 kg de estiércol producidos cada día.

El estiércol de cerdo es altamente orgánico, compuesto por excrementos, orina, restos de comida y materiales vegetales no digeridos. Generalmente, contiene altos niveles de nitrógeno, fósforo y potasio, que son nutrientes esenciales para las plantas, pero que, en exceso, pueden causar problemas ambientales.

El impacto ambiental del estiércol, si no es tratado adecuadamente, puede ser significativo. El estiércol no tratado puede generar contaminación del agua, ya que los nutrientes como los nitratos y el fósforo se lixivian y se transportan hacia cuerpos de agua cercanos. Este exceso de nutrientes puede contribuir a la eutrofización, un proceso que afecta la calidad del agua, alterando su ecología y reduciendo la biodiversidad acuática.

Aguas Residuales:

En cuanto a la cantidad generada, el agua utilizada para el lavado de los corrales y la alimentación de los cerdos es uno de los principales contribuyentes a la generación de aguas residuales. En promedio, una unidad porcina genera entre 10 a 30 litros de agua residual por cerdo por día. Esto significa que en una unidad con 1,000 cerdos, la cantidad total de agua residual generada oscila entre 10,000 a 30,000 litros por día.

Estas aguas residuales contienen materia orgánica, coliformes fecales, aceites y grasas, y sólidos suspendidos, lo que puede tener un impacto ambiental negativo si no se gestionan adecuadamente. El contenido de nitrógeno y fósforo en estas aguas es significativo, lo que puede afectar la calidad del agua si el tratamiento no es suficiente. El vertimiento de estas aguas residuales no tratadas en cuerpos de agua cercanos puede provocar contaminación y proliferación de bacterias patógenas, afectando la salud pública y la calidad del agua, además de contribuir a la eutrofización de los ecosistemas acuáticos.

Residuos Sólidos (comida no consumida, empaques, etc.):

En cuanto a los residuos sólidos, estos incluyen restos de comida no consumida, empaques, plásticos y otros materiales. En una unidad porcina de 1,000 cerdos, se estima que se generan entre 100 a 200 kg de residuos sólidos no orgánicos (como plásticos y empaques) y entre 50 a 100 kg de restos de comida no consumida por día.

Los residuos sólidos generados en la unidad incluyen principalmente plásticos, cartón, pajilla (material usado en la cama de los cerdos), y restos de alimentos no consumidos. Si estos residuos no se gestionan de manera adecuada, pueden tener un impacto ambiental considerable. El mal manejo de estos residuos puede resultar en la acumulación de materiales no biodegradables en el medio ambiente, contribuyendo a la contaminación de suelos y cuerpos de agua. Además, la

descomposición de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas puede generar gases de efecto invernadero, como metano, que contribuyen al cambio climático.

Diagnóstico de evaluación de impacto ambiental en la granja

El siguiente paso consistió en evaluar el impacto ambiental de estos residuos sobre la calidad del agua, el aire y el suelo de la zona circundante. El análisis de la calidad del agua se enfocó en identificar la presencia de materia orgánica, coliformes fecales, metales pesados y otros contaminantes. Se tomó especial atención a los cuerpos de agua cercanos a la unidad porcina, como riachuelos y pozos cercanos, para evaluar si los residuos de la unidad afectaban la biodiversidad acuática y la calidad del agua utilizada en las actividades agropecuarias de la región. Asimismo, se evaluó el impacto de los residuos sobre la calidad del aire, particularmente en cuanto a la emisión de gases de efecto invernadero, como el metano, generado en el proceso de descomposición de los residuos orgánicos. En cuanto al suelo, se estudió la posible colmatación de los terrenos por la acumulación de estiércol no tratado, lo que podría afectar la capacidad de drenaje y la fertilidad del suelo.

El estiércol de cerdos es una mezcla compleja que contiene materia orgánica, nitrógeno, fósforo, potasio y microorganismos, entre otros componentes. La dieta de los cerdos es uno de los factores clave que determina la composición de sus excretas. Estos nutrientes, en concentraciones elevadas, tienen el potencial de generar impactos ambientales significativos cuando no son manejados adecuadamente. Como se documenta en estudios previos (Cepero et al., 2012), el nitrógeno y el fósforo son dos de los elementos más relevantes en el estiércol de cerdos. Si estos nutrientes son lixiviados en exceso hacia cuerpos de agua cercanos, pueden provocar eutrofización (crecimiento excesivo de algas), lo que afecta la calidad del agua, reduce la biodiversidad acuática y limita el uso de esas aguas para la agricultura o el consumo humano (Rodríguez et al., 2017).

La cantidad generada de estiércol, que varía entre 500 a 1,000 kg diarios en el caso de esta unidad porcina, está estrechamente relacionada con el número de cerdos y

su dieta. A mayor cantidad de animales, mayor es la cantidad de estiércol generado. Este incremento en la cantidad de residuos orgánicos no gestionados adecuadamente puede generar gases de efecto invernadero (GEI), como metano (CH₄), que se libera durante la descomposición anaeróbica del estiércol. Este gas es un potente contribuyente al calentamiento global (Cepero et al., 2012). Además, el estiércol acumulado puede colmar el suelo, reduciendo su capacidad de drenaje, afectando la fertilidad y reduciendo la capacidad de producción agrícola en áreas cercanas.

Tabla 4: Impactos ambientales generados

Tipo de Residuos	Cantidad Generada (por día)	Composición	Impacto Ambiental
Estiércol	500 a 1,000 kg	Nitrógeno, fósforo, potasio, materia orgánica	Contaminación del agua, emisión de gases
Aguas Residuales	10,000 a 30,000 litros	Materia orgánica, coliformes fecales, aceites	Contaminación de fuentes hídricas, riesgos sanitarios
Residuos Sólidos	100 a 200 kg (plásticos, empaques)	Plásticos, cartón, restos de comida	Contaminación del suelo, emisión de gases

Fuente: Autor.

Este análisis permitió identificar los riesgos potenciales para la salud pública derivados de la mala gestión de los residuos, como la proliferación de enfermedades zoonóticas y la contaminación de fuentes de agua. La exposición a bacterias y parásitos presentes en los residuos sólidos y líquidos pudo generar impactos negativos para las comunidades cercanas, que dependen de estas fuentes de agua para su consumo y actividades productivas.

Tabla 5: Efectos derivados de los impactos ambientales

Tipo de Residuos	Impacto Ambiental Principal	Efectos Observados/Esperados
Estiércol	Contaminación de cuerpos de agua debido al lixiviado de nitrógeno y fósforo	Eutrofización de cuerpos de agua, reducción de biodiversidad acuática
Aguas Residuales	Contaminación microbiológica (coliformes fecales, bacterias patógenas)	Riesgo para la salud pública, contaminación de fuentes de agua potable
Residuos Sólidos	Acumulación de residuos no biodegradables como plásticos y cartón, emisión de gases como metano	Emisión de gases de efecto invernadero, contaminación del suelo y aire

Fuente: Autor.

De acuerdo con lo anterior se adelantó a evaluación de impacto ambiental, la cual se presenta a continuación.

Evaluación de impacto ambiental para la actividad de Recepción:

El análisis de los impactos ambientales de la granja porcina del Centro de Formación Agroindustrial revela varias consecuencias significativas en distintos componentes ambientales. Uno de los principales impactos identificados es la generación de olores debido a la descomposición del estiércol de cerdo. Este proceso contribuye a la contaminación atmosférica, afectando negativamente la calidad del aire. Aunque se observó la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) debido a la descomposición, el análisis mostró que su contribución fue mínima. De manera similar, se encontró que las aguas superficiales están en riesgo de contaminación debido a los lixiviados del estiércol, así como la posible contaminación microbiana en los cuerpos de agua cercanos. Las altas cargas de materia orgánica provenientes del lavado de la granja también son una

preocupación ambiental, llevando a la reducción de la biodiversidad acuática y a la eutrofización, lo que podría comprometer la calidad del agua. Además, el elevado consumo de agua en las operaciones de la granja genera una presión adicional sobre los recursos hídricos locales, destacando la necesidad de una gestión eficiente del agua.

Las características del suelo también se ven afectadas por las actividades de la granja porcina. La acidificación del suelo y la acumulación de metales pesados debido al estiércol son preocupaciones que pueden afectar la salud y la fertilidad del suelo a largo plazo. Además, se identificó el desarrollo de microorganismos patógenos en el suelo, junto con la acumulación excesiva de nitrógeno y fósforo, lo que podría deteriorar el equilibrio ecológico del suelo. La acumulación de residuos orgánicos y no biodegradables en el suelo, así como la colmatación de los poros del suelo, son riesgos adicionales para la permeabilidad del suelo y su capacidad para sustentar el crecimiento de las plantas. En el ámbito biológico, los impactos incluyen alteraciones en la cobertura vegetal local y el desplazamiento de fauna debido a cambios en el hábitat. La propagación de vectores de enfermedades debido a los olores y residuos en la granja es otro riesgo para la salud pública que requiere atención. En el aspecto socioeconómico, aunque no se identificaron impactos negativos en la generación de ingresos para la granja, la creación de empleo para la comunidad local es un aspecto positivo que contribuye a la economía regional.

Para la evaluación de impacto ambiental en la unidad porcina del Centro de Formación Agroindustrial La Angostura, se utilizó la metodología CONESA, un enfoque ampliamente reconocido y aplicado en estudios ambientales. Esta metodología permite una evaluación integral de los efectos ambientales, considerando diversos factores como la calidad del agua, del aire y del suelo, además de los impactos sobre la biodiversidad local. A través de la metodología CONESA, se identificaron, clasificaron y cuantificaron los impactos generados por los residuos orgánicos, asegurando un análisis detallado que sirvió para la

formulación de medidas correctivas y preventivas orientadas a mitigar los efectos negativos derivados de la actividad porcina.

Tabla 6: Evaluación de Impacto Ambiental para la actividad de Recepción.

MEDIO	COMPONENTE	ELEMENTO	IMPACTO AMBIENTAL	RECEPCIÓN													
				Signo	(I)	(Ex)	(Mo)	(Pe)	(Rv)	(Si)	(Ac)	(Ef)	(Pr)	(Mc)	(I)	Tipo	Riesgo
Abiotico	Atmosferico	Características del aire	Generación de olores por la descomposición del estiercol	-	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	20	C	C
			Emisión de GEI por la descomposición del estiercol	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
	Hidrologico	Características del agua	Contaminación de aguas superficiales por lixiviados del estiercol	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
			Contaminación microbiana de aguas superficiales por lixiviados del estiercol	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
			Altas cargas de materia orgánica producto del lavado de la granja	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
			Reducción de la biodiversidad acuática	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
			Eutrofización de cuerpos de agua	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
			Elevado consumo de agua	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C

MEDIO	COMPONENTE	ELEMENTO	IMPACTO AMBIENTAL	RECEPCIÓN													
				Signo	(I)	(Ex)	(Mo)	(Pe)	(Rv)	(Si)	(Ac)	(Ef)	(Pr)	(Mc)	(I)	Tipo	Riesgo
	Suelo	Características del suelo	Acidificación del suelo por la descomposición del estiercol	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
			Acumulación de metales pesados en el suelo por el estiercol	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
			Desarrollo de microorganismos patógenos en el suelo	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
			Acumulación excesiva de nitrógeno y fósforo en el suelo	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
			Acumulación de residuos orgánicos		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	13	C	C
			Acumulación de residuos no biodegradables	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
			Colmatación por taponamiento de los poros del suelo	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
Biótico	Flora	Cobertura	Alteración de la cobertura vegetal	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
	Fauna	Habitad	Desplazamiento de fauna	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
			Alteración del hábitad	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
			Propagación de vectores derivada de olores y	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C

MEDIO	COMPONENTE	ELEMENTO	IMPACTO AMBIENTAL	RECEPCIÓN													
				Signo	(I)	(Ex)	(Mo)	(Pe)	(Rv)	(Si)	(Ac)	(Ef)	(Pr)	(Mc)	(I)	Tipo	Riesgo
			residuos en la granja														
Socio económico	Salud	Sanidad	Afectaciones a la salud de las personas	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
	Económico	ingresos	Generación de ingresos para la unidad productiva	+	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	13	C	C
	Comunidad	Trabajo	Generación de empleo para la comunidad	+	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	13	C	C

El análisis de los impactos ambientales derivados de la actividad de alimentación en la granja porcina muestra varios efectos significativos en diferentes componentes ambientales. Uno de los principales impactos en el componente atmosférico es la generación de olores debido a la descomposición del estiércol, lo que afecta la calidad del aire. Este impacto fue clasificado como de alta magnitud con una puntuación de 61, lo que sugiere que la granja podría ser responsable de la emisión de malos olores que afectan a las áreas circundantes. Además, la descomposición del estiércol también genera emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), especialmente metano, contribuyendo a la contaminación atmosférica y al cambio climático. A pesar de que las emisiones de GEI fueron clasificadas como de riesgo moderado (40), es evidente que los impactos derivados de la alimentación son significativos, ya que tanto los olores como los gases de efecto invernadero son de gran preocupación en la gestión ambiental de la granja.

En términos de los impactos en los recursos hídricos y el suelo, se identificaron varios efectos que podrían alterar los ecosistemas circundantes. Los lixiviados del estiércol pueden contaminar las aguas superficiales y contribuir a la eutrofización de los cuerpos de agua cercanos, lo que afecta la calidad del agua y reduce la biodiversidad acuática. Además, las altas cargas de materia orgánica resultantes del lavado de la granja también pueden causar problemas en los cuerpos de agua, impactando negativamente en el equilibrio ecológico. A nivel del suelo, se observó una acumulación excesiva de nitrógeno y fósforo, lo que podría afectar la calidad del suelo a largo plazo y alterar los ciclos biogeoquímicos. La acumulación de residuos orgánicos también es un desafío significativo, pues contribuye a la degradación del suelo y la posible colmatación por taponamiento de los poros, afectando su capacidad de absorción y retención de agua. Los impactos bióticos, como el desplazamiento de fauna y la propagación de vectores, también se identificaron como problemáticos debido a los residuos orgánicos y los olores generados por la granja. Estos impactos, tanto en el medio ambiente como en la salud de los ecosistemas circundantes, resaltan la necesidad urgente de aplicar medidas de manejo eficiente y tecnologías adecuadas para mitigar estos efectos.

Tabla 7: Evaluación de Impacto Ambiental para la actividad de Alimentación

MEDIO	COMPONENT E	ELEMENTO	IMPACTO AMBIENTAL	ALIMENTACIÓN													
				Signo	(I)	(Ex)	(Mo)	(Pe)	(Rv)	(Si)	(Ac)	(Ef)	(Pr)	(Mc)	(I)	Tipo	Riesgo
Abiótico	atmosférico	características del aire	Generación de olores por la descomposición del estiércol	-	12	4	2	2	1	1	4	4	2	1	61	A	A
			Emisión de GEI por la descomposición del estiércol	-	8	1	2	2	2	1	4	1	1	1	40	C	C
	hidrológico	características del agua	Contaminación de aguas superficiales por lixiviados del estiércol	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
			Contaminación microbiana de aguas superficiales por lixiviados del estiércol	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
			Altas cargas de materia orgánica producto del lavado de la granja	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
			Reducción de la biodiversidad acuática	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
			Eutrofización de cuerpos de agua	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
			Elevado consumo de agua	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
	Suelo	Características del suelo	Acidificación del suelo por la descomposición del estiércol	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C

MEDIO	COMPONENTE	ELEMENTO	IMPACTO AMBIENTAL														
				ALIMENTACIÓN													
				Signo	(I)	(Ex)	(Mo)	(Pe)	(Rv)	(Si)	(Ac)	(Ef)	(Pr)	(Mc)	(I)	Tipo	Riesgo
			Acumulación de metales pesados en el suelo por el estiercol	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
			Desarrollo de microorganismos patógenos en el suelo	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
			Acumulación excesiva de nitrógeno y fosforo en el suelo	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
			Acumulación de residuos orgánicos	-	12	1	4	4	2	2	4	4	4	2	64	A	A
			Acumulación de residuos no biodegradables	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	13	C	C
			Colmatación por taponamiento de los poros del suelo	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
Biótico	Flora	Cobertura	Alteración de la cobertura vegetal	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
	Fauna	Habitad	Desplazamiento de fauna	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
			Alteración del habitat	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
			Propagación de vectores derivada de olores y residuos en la granja	-	8	4	8	4	2	2	4	4	4	4	64	A	A
Socio económico	Salud	Sanidad	Afectaciones a la salud de las personas	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C

MEDIO	COMPONENTE	ELEMENTO	IMPACTO AMBIENTAL														
				ALIMENTACIÓN													
				Signo	(I)	(Ex)	(Mo)	(Pe)	(Rv)	(Si)	(Ac)	(Ef)	(Pr)	(Mc)	(I)	Tipo	Riesgo
	Económico	ingresos	Generación de ingresos para la unidad productiva	+	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	13	C	C
	Comunidad	Trabajo	Generación de empleo para la comunidad	+	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	12	C	C

Fuente: Autor.

El análisis de los impactos ambientales derivados de la actividad de limpieza en la granja porcina revela varios efectos significativos en diversos componentes del medio ambiente. Uno de los impactos más destacados en el componente atmosférico es la generación de olores debido a la descomposición del estiércol, que afectó la calidad del aire en las cercanías de la granja, con una puntuación de 68, lo que refleja un impacto de alta magnitud. Además, las altas cargas de materia orgánica generadas por el lavado de la granja también tienen un impacto considerable en el agua superficial, lo que podría conducir a la contaminación de las fuentes de agua cercanas. Este proceso de limpieza contribuye a la eutrofización y la reducción de la biodiversidad acuática, factores que deterioran aún más los ecosistemas acuáticos cercanos.

En cuanto al suelo, el impacto más crítico es la acumulación de residuos orgánicos, lo que provoca una acumulación excesiva de nitrógeno y fósforo, lo que afecta la calidad del suelo y puede alterar sus propiedades, contribuyendo a la acidificación del suelo. La acumulación de residuos no biodegradables y la colmatación de los poros del suelo también son preocupantes, ya que afectan la capacidad de los suelos para retener agua y nutrientes, lo que podría comprometer la fertilidad del terreno a largo plazo. Los impactos bióticos incluyen la alteración del hábitat y el desplazamiento de fauna debido a las actividades de limpieza, lo que afecta a la fauna local. Además, los olores y residuos orgánicos pueden facilitar la propagación de vectores, como moscas y otros insectos, lo que aumenta los riesgos de enfermedades. A pesar de estos impactos negativos, la actividad de limpieza también tiene efectos positivos en el ámbito socioeconómico, como la generación de ingresos para la unidad productiva y la creación de empleo en la comunidad, lo que contribuye al desarrollo local.

Tabla 8: Evaluación de Impacto Ambiental para la actividad de Limpieza

MEDIO	COMPONENTE	ELEMENTO	IMPACTO AMBIENTAL	LIMPIEZA													
				Signo	(I)	(Ex)	(Mo)	(Pe)	(Rv)	(Si)	(Ac)	(Ef)	(Pr)	(Mc)	(I)	Tipo	Riesgo
Abiotico	Atmosferico	Características del aire	Generación de olores por la descomposición del estiercol	-	12	4	4	2	2	4	4	4	2	2	68	A	A
			Emisión de GEI por la descomposición del estiercol	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
	Hidrologico	Características del agua	Contaminación de aguas superficiales por lixiviados del estiercol	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
			Contaminación microbiana de aguas superficiales por lixiviados del estiercol	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
			Altas cargas de materia orgánica producto del lavado de la granja	-	12	4	8	4	4	1	4	1	4	4	74	A	A
			Reducción de la biodiversidad acuática	-	8	2	4	2	2	1	4	1	1	2	45	B	B
			Eutrofización de cuerpos de agua	-	6	1	1	2	2	1	1	4	4	2	37	C	C
			Elevado consumo de agua	-	10	2	4	2	1	1	1	1	1	1	46	B	B

MEDIO	COMPONENTE	ELEMENTO	IMPACTO AMBIENTAL	LIMPIEZA													
				Signo	(I)	(Ex)	(Mo)	(Pe)	(Rv)	(Si)	(Ac)	(Ef)	(Pr)	(Mc)	(I)	Tipo	Riesgo
	Suelo	Características del suelo	Acidificación del suelo por la descomposición del estiercol	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
			Acumulación de metales pesados en el suelo por el estiercol	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
			Desarrollo de microorganismos patógenos en el suelo	-	8	1	2	2	2	2	4	4	1	2	45	B	B
			Acumulación excesiva de nitrógeno y fosforo en el suelo	-	4	1	1	2	2	2	4	1	1	2	29	C	C
			Acumulación de residuos orgánicos	-	12	8	4	2	2	1	4	4	2	4	75	A	A
			Acumulación de residuos no biodegradables	-	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	15	C	C
			Colmatación por taponamiento de los poros del suelo	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
Biótico	Flora	Cobertura	Alteración de la cobertura vegetal	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
	Fauna	Habitad	Desplazamiento de fauna	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
			Alteración del habitat	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
			Propagación de vectores derivada de olores y residuos en la granja	-	12	4	2	2	2	2	4	1	4	4	65	A	A

MEDIO	COMPONENTE	ELEMENTO	IMPACTO AMBIENTAL														
				LIMPIEZA													
				Signo	(I)	(Ex)	(Mo)	(Pe)	(Rv)	(Si)	(Ac)	(Ef)	(Pr)	(Mc)	(I)	Tipo	Riesgo
Socio económico	Salud	Sanidad	Afectaciones a la salud de las personas	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
	Económico	ingresos	Generación de ingresos para la unidad productiva	+	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	13	C	C
	Comunidad	Trabajo	Generación de empleo para la comunidad	+	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	13	C	C

Fuente: Autor.

En la actividad de comercialización, los impactos ambientales negativos son prácticamente inexistentes. El análisis de los componentes abióticos, como el aire, el agua, el suelo y los bióticos, no refleja efectos adversos notables derivados de esta actividad en la granja porcina. No se reportan emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) ni generación de olores debido a la descomposición del estiércol, ni tampoco hay contaminación de las aguas superficiales por lixiviados o materia orgánica. Además, no se detectan impactos significativos en la biodiversidad acuática ni en la calidad del agua en las zonas cercanas, y no se observa un elevado consumo de agua en el proceso de comercialización. Las características del suelo tampoco presentan alteraciones, ya que no se registra acidificación ni acumulación de metales pesados en el suelo.

Por otro lado, la actividad de comercialización no genera alteraciones en la flora ni la fauna circundante, ya que no se reportan desplazamientos de especies ni alteraciones de hábitats. De manera general, no hay evidencia de propagación de vectores derivados de olores o residuos generados por la actividad de comercialización. Estos resultados indican que, desde el punto de vista ambiental, la comercialización en esta unidad porcina es una actividad de bajo impacto. Esto sugiere que las prácticas implementadas en esta fase son eficientes y bien gestionadas, lo que contribuye a minimizar los efectos negativos en el medio ambiente.

Tabla 9: Evaluación de Impacto Ambiental para la actividad de Comercialización

MEDIO	COMPONENTE	ELEMENTO	IMPACTO AMBIENTAL	COMERCIALIZACIÓN													
				Signo	(I)	(Ex)	(Mo)	(Pe)	(Rv)	(Si)	(Ac)	(Ef)	(Pr)	(Mc)	(I)	Tipo	Riesgo
Abiotico	Atmosferico	Caracteristicas del aire	Generación de olores por la descomposición del estiercol	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
			Emisión de GEI por la descomposición del estiercol	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
	Hidrologico	Caracteristicas del agua	Contaminación de aguas superficiales por lixiviados del estiercol	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
			Contaminación microbiana de aguas superficiales por lixiviados del estiercol	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
			Altas cargas de materia orgánica producto del lavado de la granja	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
			Reducción de la biodiversidad acuática	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
			Eutrofización de cuerpos de agua	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
			Elevado consumo de agua	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C

MEDIO	COMPONENTE	ELEMEN TO	IMPACTO AMBIENTAL	COMERCIALIZACIÓN													
				Signo	(I)	(Ex)	(Mo)	(Pe)	(Rv)	(Si)	(Ac)	(Ef)	(Pr)	(Mc)	(I)	Tipo	Riesgo
	Suelo	Caracteristi cas del suelo	Acidificación del suelo por la descomposición del estiércol	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
			Acumulación de metales pesados en el suelo por el estiércol	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
			Desarrollo de microorganismos patógenos en el suelo	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
			Acumulación excesiva de nitrógeno y fosforo en el suelo	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
			Acumulación de residuos orgánicos	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
			Acumulación de residuos no biodegradables	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	13	C	C
			Colmatación por taponamiento de los poros del suelo	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C
Biótico	Flora	Cobertura	Alteración de la cobertura vegetal	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C	
	Fauna	Habitad	Desplazamiento de fauna	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C	
			Alteración del habitat	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C	
			Propagación de vectores derivada de olores y residuos en la granja	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C	C	

Fuente: Autor.

7.2. Fase 2: Diseño del Plan de Manejo Integral de Residuos

El Plan de Manejo Integral de Residuos para la granja porcina del Centro de Formación Agroindustrial La Angostura se concibe como una estrategia integral para abordar los impactos ambientales derivados de la actividad porcina. La granja, al ser un centro educativo y productivo, tiene la responsabilidad de no solo producir cerdos, sino también de hacerlo de manera sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

La unidad porcina del Centro de Formación Agroindustrial, en la actualidad, cuenta con una infraestructura completamente funcional con capacidad para aproximadamente 100 individuos. Esta unidad está equipada con suministro de energía eléctrica y agua potable, siendo este último recurso abastecido mediante una tubería de ½" que llega a los abrevaderos ubicados en las zonas de establo. Los residuos resultantes de la actividad productiva porcina incluyen excretas y orina de los cerdos, además de otros desechos provenientes de las zonas de establo, como restos de comida no digerida, pelo, descamación y cantidades variables de agua proveniente de las labores de lavado y las pérdidas en los abrevaderos. En algunos casos, estos residuos también incluyen material vegetal utilizado como cama para los animales (Rodríguez et al., 2017). La disposición y el manejo inadecuado de estos residuos pueden generar problemas significativos en cuanto a la contaminación ambiental si no se gestionan de manera eficiente.

Este plan tiene como meta principal minimizar las emisiones contaminantes, gestionar adecuadamente los residuos sólidos y líquidos generados, y mejorar la calidad ambiental en la zona circundante. Además de las tecnologías de tratamiento de residuos, el plan busca sensibilizar al personal del centro y a los futuros profesionales en buenas prácticas de manejo ambiental, haciendo del centro un referente de sostenibilidad agroindustrial.

Uno de los aspectos clave del plan es la implementación de biodigestores anaeróbicos para el tratamiento de las aguas residuales generadas. Los biodigestores permiten la conversión de residuos orgánicos en biogás a través de un proceso anaeróbico, lo que reduce significativamente las emisiones de metano y amoníaco, gases de efecto invernadero responsables del cambio climático. Este biogás puede aprovecharse como fuente de energía renovable para la granja, sustituyendo parcialmente el uso de combustibles fósiles y contribuyendo a la autonomía energética del centro. Además, el proceso anaeróbico genera digestato, un subproducto que puede ser utilizado como fertilizante orgánico de alta calidad para los cultivos, cerrando el ciclo de los residuos generados en la unidad porcina.

Otro componente fundamental en la gestión de residuos sólidos es el compostaje controlado. El estiércol y los restos de comida no consumida son una fuente importante de residuos orgánicos en la unidad porcina. Para evitar que estos residuos se acumulen y generen olores o afecten la calidad del suelo, se implementará un sistema de compostaje. Este proceso no solo transformará el estiércol en un abono orgánico útil para la agricultura, sino que también reducirá las emisiones de gases contaminantes como el metano, que se generan cuando los residuos orgánicos se descomponen sin oxígeno. El compostaje también contribuirá a mejorar la fertilidad del suelo, promoviendo prácticas agrícolas más sostenibles dentro del centro.

El manejo de vectores y plagas es otro aspecto esencial del plan, ya que los residuos orgánicos pueden atraer insectos y roedores que representan un riesgo para la salud pública y animal. Se implementará un sistema de control integrado de plagas que combinará métodos físicos, biológicos y químicos. La limpieza frecuente de los corrales y la disposición adecuada de los residuos orgánicos en las áreas de compostaje evitarán la proliferación de moscas, roedores y otros vectores. Además, se utilizarán trampas ecológicas y se promoverá el uso de aceites esenciales y otros repelentes naturales para reducir la presencia de plagas sin causar daño al medio ambiente ni a la salud de los animales.

Además de las tecnologías propuestas, se le dará una gran importancia a la sensibilización y capacitación de los operarios y personal del centro. Este plan no solo busca aplicar medidas tecnológicas avanzadas, sino también fomentar una cultura ambiental entre los trabajadores y futuros técnicos agroindustriales. Se ofrecerán talleres de formación sobre el manejo adecuado de residuos, la importancia de la reducción de la contaminación y la implementación de prácticas sostenibles. El personal será capacitado en el uso de los sistemas de tratamiento de residuos, el monitoreo de la calidad del agua y el control de plagas, para garantizar que el manejo de los residuos se realice de manera eficiente y cumpla con las normativas ambientales.

El monitoreo continuo del sistema será esencial para garantizar su efectividad a largo plazo. Se establecerán indicadores de rendimiento que medirán la cantidad de residuos reciclados, la eficiencia de los sistemas de tratamiento de aguas residuales y la reducción de las emisiones de gases contaminantes. Además, se realizarán auditorías periódicas para verificar el cumplimiento con la normativa ambiental vigente. Estos monitoreos permitirán identificar áreas de mejora y ajustar las prácticas según sea necesario, asegurando que la granja continúe operando de manera sostenible. La revisión periódica de los resultados también permitirá a la unidad porcina adaptar sus prácticas a nuevas tecnologías y regulaciones ambientales, manteniendo así su compromiso con el desarrollo agroindustrial responsable.

Este plan de manejo integral de residuos es una respuesta integral a los desafíos ambientales que enfrenta la unidad porcina del Centro de Formación Agroindustrial La Angostura. Al incorporar prácticas de reducción, reutilización y tratamiento de residuos, el centro no solo mejorará su desempeño ambiental, sino que también fortalecerá su modelo educativo, preparando a los futuros profesionales para enfrentar los retos del sector agroindustrial con una perspectiva sostenible.

Para ello se presenta la siguiente ficha de manejo en este impacto:

La Ficha Ambiental para la Implementación del Biodigestor en la granja porcina del Centro de Formación Agroindustrial La Angostura tiene como objetivo principal proporcionar un plan integral de manejo de residuos sólidos, enfocado en el tratamiento y gestión de los residuos orgánicos generados en la unidad porcina. La ficha abarca aspectos clave como los objetivos, metas y actividades específicas, así como las medidas de manejo, el cronograma de actividades y el presupuesto necesario para la implementación y el monitoreo del sistema. De esta manera, se busca reducir los impactos ambientales, como la contaminación del agua, la emisión de gases de efecto invernadero y la mejora de la eficiencia en la gestión de residuos. El biodigestor, como tecnología central, permitirá transformar los residuos orgánicos en biogás y fertilizante orgánico, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental y energética del centro.

El método utilizado para la construcción de las fichas de manejo en el contexto de la implementación del sistema de biodigestores en la unidad porcina del Centro de Formación Agroindustrial La Angostura fue un enfoque estructurado y sistemático, basado en la planificación ambiental estratégica, la evaluación de impactos y la gestión de residuos. A continuación, se detallan los pasos del proceso metodológico utilizado y los criterios aplicados para determinar las metas.

- ✓ Diagnóstico y evaluación preliminar de residuos
- ✓ Selección de criterios para la determinación de metas
- ✓ Establecimiento de objetivos específicos
- ✓ Desarrollo de indicadores de desempeño

Las fichas de manejo se construyeron a partir de un diagnóstico detallado de los residuos, con criterios basados en la eficiencia operativa, la sostenibilidad ambiental y el cumplimiento de normativas. Las metas se determinaron a partir de las proyecciones de residuos generados, la capacidad de los biodigestores, y los objetivos de reducción de impactos ambientales y mejora de la eficiencia energética.

Tabla 10: Ficha de manejo Ambiental

Categoría		Detalle
Nombre del Programa		Plan de Manejo de Residuos Sólidos
Nombre del Subprograma		Implementación de un Biodigestor para el Manejo de Residuos Orgánicos
Objetivos		Reducir los impactos ambientales derivados de los residuos orgánicos generados transformándolos en biogás y fertilizante orgánico.
Metas		Reducir la cantidad de residuos orgánicos generados en un 30% durante el primer año. Generar un 5% del consumo de gas necesario para la granja.
Etapas de Aplicación		Preoperativa: Evaluación e instalación del biodigestor. Operativa: Monitoreo del sistema. Post-operativa: Evaluación y ajustes.
Evaluación Ambiental Actividad		- Generación de residuos sólidos orgánicos
Evaluación Ambiental Impacto		- B (Moderada)
Evaluación Ambiental Elemento		- Estiércol y restos orgánicos

Evaluación Ambiental	- Moderada
Significancia	
Medida de Manejo - Acción	Implementación del biodigestor y monitoreo de biogás
Tipo de Medida	Prevención, Mitigación
Medida de Manejo - Acciones por Desarrollar	Instalación del biodigestor, monitoreo constante, recolección y almacenamiento de residuos orgánicos, capacitación del personal.
Tipo de Medida	P (Prevención)
Medida de Manejo - Indicadores	- Generación de biogás, reducción de residuos, emisiones de gases de efecto invernadero
Frecuencia de Aplicación	Diario, Mensual
% Cumplimiento	85%
Responsable	Ingeniero Ambiental
Tipo de Registro	Registro diario de biogás, informes mensuales de residuos
Lugar de Aplicación	Instalación del biodigestor en la unidad porcina del Centro de Formación Agroindustrial La Angostura
Población Beneficiada	Personal de la granja, comunidad circundante

Mecanismos y Estrategias Participativas	Capacitación continua del personal, monitoreo de biogás, recolección de residuos, control de emisiones
Personal Requerido	Ingeniero Ambiental, Operarios de la granja
Cronograma	Instalación del biodigestor y monitoreo operativo
Presupuesto - Acción o Medida	Estación de monitoreo de biogás, capacitación ambiental, mantenimiento de equipos
Presupuesto - Tipo de Presupuesto	Mano de obra: Ingeniero Ambiental (mensual), personal técnico (única vez), equipo de monitoreo
Presupuesto - Descripción	Costo de instalación del biodigestor, monitoreo de emisiones, capacitación del personal, equipos para monitoreo, mantenimiento del sistema.

Fuente: Autor.

Las medidas de manejo presentadas en la ficha ambiental se centran en la implementación del biodigestor como una estrategia integral para el tratamiento de los residuos orgánicos. El biodigestor convertirá los residuos sólidos generados en la granja (estiércol y restos de comida) en biogás, una fuente de energía renovable que reducirá la dependencia de fuentes no renovables. Además, el proceso anaeróbico permitirá reducir las emisiones de gases contaminantes, como metano y amoníaco, mejorando la calidad del aire. Las acciones por desarrollar incluyen la instalación del biodigestor, el monitoreo constante de su funcionamiento, la capacitación del personal para el manejo adecuado de los residuos, y la recolección eficiente de los desechos orgánicos. Este conjunto de medidas se orienta a la prevención, mitigación y corrección de los impactos ambientales derivados de la actividad porcina.

Tabla 11: Cronograma

MEDIDA DE MANEJO	ANUAL	MENSUAL	SEMANAL	DIARIA	OTRO
INSTALACIÓN DEL BIODIGESTOR	X				
CAPACITACIÓN DEL PERSONAL		X			
MONITOREO DEL BIOGÁS Y RESIDUOS	X		X	X	
EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA					X

Fuente: Autor.

El presupuesto destinado para la implementación y operación del sistema de biodigestión se detalla en la ficha, cubriendo tanto los costos directos como los costos indirectos asociados. El presupuesto incluye la compra e instalación del biodigestor, los equipos de monitoreo de biogás, y la capacitación del personal. También se contemplan costos de mantenimiento y reparaciones de los equipos, así como la adquisición de insumos necesarios para el proceso de compostaje y el monitoreo de la calidad del aire. Este presupuesto asegura que el sistema será viable tanto desde el punto de vista técnico como económico, permitiendo a la granja gestionar sus residuos de manera eficiente y sostenible.

Tabla 12: costo de implementación de las acciones

ACCIÓN O MEDIDA	TIPO DE PRESUPUESTO	DESCRIPCIÓN	COSTO TOTAL
Instalación del Biodigestor	Equipos	Costo de instalación del biodigestor	\$ 56.531.980
Capacitación ambiental	Mano de Obra	Instrucción del personal	\$ 150,000.00

Mantenimiento y monitoreo de biogás	Mano de Obra	Ingeniero Ambiental	\$ 500,000.00
Insumos y materiales (tuberías, tanques)	Equipos	Costo de materiales de instalación	\$ 1,200,000.00

Fuente: Autor.

Los indicadores y el monitoreo son fundamentales para garantizar que el sistema de manejo de residuos y el biodigestor funcionen de manera eficiente y logren los objetivos establecidos. En la ficha ambiental, se establecen indicadores clave de rendimiento que permiten evaluar de manera cuantitativa y cualitativa el progreso del sistema. Estos indicadores incluyen la generación de biogás, la reducción de residuos orgánicos, las emisiones de gases de efecto invernadero y la calidad del agua en los cuerpos cercanos a la granja.

El ingeniero ambiental será responsable del monitoreo diario de la generación de biogás, con un cumplimiento estimado del 85%, y del monitoreo mensual de emisiones de gases de efecto invernadero, con un cumplimiento del 80%. El técnico de operaciones llevará a cabo el seguimiento mensual de la reducción de residuos orgánicos, con un cumplimiento del 90%. Finalmente, el departamento ambiental realizará un análisis trimestral de la calidad del agua en los cuerpos cercanos, con un cumplimiento esperado del 95%.

El registro de estos indicadores permitirá realizar ajustes continuos y mejorar el funcionamiento del sistema, asegurando que los residuos se manejen de manera adecuada y que se minimicen los impactos ambientales derivados de la actividad porcina. Además, estos indicadores servirán para la evaluación de la eficacia de las medidas implementadas y facilitarán el cumplimiento de las normativas ambientales vigentes.

Tabla 13: tabla de indicadores

Indicador	Frecuencia de Aplicación	% Cumplimiento	Responsable	Tipo de Registro
Generación de biogás	Diario	85%	Ingeniero Ambiental	Registro diario de biogás producido
Reducción de residuos orgánicos	Mensual	90%	Técnico de Operaciones	Informe mensual de residuos procesados
Emisiones de gases de efecto invernadero	Mensual	80%	Ingeniero Ambiental	Monitoreo mensual de emisiones de metano
Calidad del agua (cuerpos cercanos)	Trimestral	95%	Departamento Ambiental	Análisis trimestral de la calidad del agua

Fuente: Autor.

Alternativas de Tratamiento y Aprovechamiento de Residuos Generados en la Unidad Porcina del Centro de Formación

Biodigestor

Una de las soluciones más efectivas para el tratamiento de los residuos orgánicos generados en la unidad porcina es la implementación de un biodigestor. Este sistema permite mitigar los impactos económicos, sociales y ambientales derivados

de los residuos orgánicos producidos por los cerdos. Según Martínez (2015), los digestores anaeróbicos se pueden utilizar para producir biogás a partir de diversos materiales orgánicos, como residuos vegetales, estiércol, efluentes de la industria alimentaria, y otros desechos orgánicos. Durante el proceso de bioconversión, diferentes etapas tienen diferentes velocidades de degradación: la celulosa se descompone en semanas, las hemicelulosa y proteínas en días, y las moléculas más pequeñas, como azúcares, ácidos grasos y alcoholes, en horas. Sin embargo, la lignina, un compuesto complejo presente en las plantas, no se degrada en la mayoría de los sistemas de digestión anaeróbica (Perevochtchikova, 2016).

La eficiencia de la digestión anaeróbica depende de varios factores, entre los que se incluyen la composición química de los residuos, ya que las sustancias fácilmente degradables, como proteínas, carbohidratos y lípidos, generan una mayor producción de metano en comparación con la celulosa, que es más difícil de descomponer (Alvarez et al., 2020). Otros factores importantes son la temperatura, siendo más rápida la digestión anaeróbica a temperaturas cercanas a 35°C, y el pH, ya que los microorganismos metanogénicos funcionan mejor en un rango de pH de 6,6 a 7,4 (Cepero et al., 2012).

Factores Biológicos

La adición de bacterias termofílicas aeróbicas (TA) tiene un gran potencial para acelerar la digestión anaeróbica de los desechos biológicos. Según Castro et al. (2019), la adición de un 5% de lodos TA a los lodos metanogénicos aumentó la producción de biogás, especialmente con una mayor concentración de metano (50-67%). Este aumento se debe a la solubilización de los lodos y a la influencia de las enzimas de las bacterias TA, que facilitan la hidrólisis de los lodos durante la digestión anaeróbica.

Importancia de los Metanógenos

El funcionamiento de los metanógenos es crucial en el proceso de digestión anaeróbica. Estos microorganismos, como los acetotróficos y hidrogenotróficos, son responsables de convertir el acetato y el hidrógeno en metano (CH_4) durante la degradación de los residuos orgánicos. La actividad de los metanógenos es esencial para un proceso eficiente de digestión anaeróbica, aunque la disponibilidad de hidrógeno puede ser un factor limitante para estos microorganismos (Pinos et al., 2012).

Fases del Proceso de Digestión Anaeróbica

El proceso de digestión anaeróbica se desarrolla en cuatro fases principales: la hidrólisis, la acidogénesis, la acetogénesis y la metanogénesis. En la hidrólisis, los sustratos complejos, como celulosa, lípidos y proteínas, son descompuestos por enzimas extracelulares producidas por las bacterias hidrolíticas, convirtiéndolos en compuestos solubles, como azúcares y aminoácidos. En la acidogénesis, los compuestos solubles se fermentan, produciendo ácidos grasos volátiles, alcoholes e hidrógeno, en un ambiente ácido (pH entre 5.1 y 6.8) (Castro et al., 2019).

Biogás y Su Composición

El biogás es un combustible gaseoso de densidad de $1,133 \text{ kg/m}^3$ y de contenido energético medio ($\sim 22 \text{ MJ/m}^3$). Se produce a partir de la descomposición anaeróbica de residuos orgánicos, como estiércol, residuos de alimentos y otros desechos orgánicos (Paolini et al., 2018). Este gas está compuesto principalmente por metano (CH_4), un potente gas de efecto invernadero. En un biodigestor, la mezcla de metano y dióxido de carbono se utiliza como fuente de energía para la granja. El biogás producido tiene una concentración de metano que varía entre 55% y 70%, y es considerado una alternativa energética limpia que contribuye a la reducción de las emisiones contaminantes (Alcaldía de Campoalegre, 2021).

7.3. Fase 3: Propuesta del Sistema de Manejo de Residuos

La Implementación y Evaluación del Sistema de Manejo de Residuos es crucial para garantizar que el sistema diseñado en la fase anterior sea llevado a la práctica de manera efectiva y eficiente. Esta fase tiene como objetivo transformar la planificación y el diseño del sistema en acciones concretas que no solo benefician a la unidad porcina, sino que también contribuyan a la mejora ambiental de la zona circundante. El primer paso en este proceso es la capacitación exhaustiva del personal de la unidad porcina. Esta capacitación es esencial para que todos los involucrados, desde operarios hasta gestores y técnicos, comprendan y apliquen correctamente las nuevas prácticas de manejo de residuos. Además, garantizar que el personal se familiarice con las nuevas tecnologías y sistemas de manejo de residuos asegura la correcta operación del biodigestor, los sistemas de compostaje y los humedales artificiales, lo que a su vez contribuye a la sostenibilidad a largo plazo del sistema.

La capacitación no solo se limitará a la transmisión de conocimientos técnicos sobre los sistemas de manejo, sino que incluirá talleres educativos sobre la importancia de seguir los protocolos establecidos y la necesidad de proteger el medio ambiente. Es fundamental que el personal entienda cómo sus acciones diarias pueden afectar la salud del entorno, tanto a nivel local como global, y cómo un manejo adecuado de los residuos contribuye a la reducción de impactos negativos como la contaminación del agua, el aire y el suelo. Estos talleres también fomentarán un compromiso ambiental más allá de las prácticas operativas, creando conciencia sobre la importancia de aplicar un enfoque de producción limpia que minimice la huella ecológica de la unidad porcina.

Una vez completada la capacitación del personal, se procederá con la implementación efectiva del sistema de manejo integral de residuos. Esta etapa incluirá la ejecución de las estrategias diseñadas en fases anteriores, como la

recolección, almacenamiento, tratamiento y disposición final de los residuos. La correcta ejecución de estas actividades dependerá en gran medida de los procedimientos operativos establecidos, los cuales guiarán cada uno de los pasos. Para la recolección, se designarán puntos específicos donde los residuos serán segregados adecuadamente según su tipo. El almacenamiento se llevará a cabo en contenedores adecuados para evitar la contaminación de otras áreas y asegurar que los residuos sean tratados de manera eficiente. El tratamiento se realizará utilizando tecnologías como la digestión anaeróbica y el compostaje, mientras que la disposición final se efectuará con los residuos que no sean reutilizables o reciclables.

El proceso de instalación de tecnologías seleccionadas será otro componente clave en esta fase. Para asegurar que el sistema funcione de manera eficiente, se instalarán equipos para la digestión anaeróbica, compostaje y la construcción de humedales artificiales. Los biodigestores anaeróbicos se instalarán para tratar los residuos orgánicos y generar biogás como fuente de energía renovable. Los humedales artificiales se utilizarán para el tratamiento de las aguas residuales, mejorando su calidad y contribuyendo a la reducción de contaminantes. Estos sistemas, además de ser eficientes, también son sostenibles, ya que aprovechan recursos naturales para procesar los residuos de manera que se minimicen los impactos ambientales Olaya (2006).

En paralelo, se llevará a cabo un proceso continuo de monitoreo y evaluación para medir los resultados obtenidos durante la implementación del sistema. Se recolectarán datos sobre la mejora de la calidad del agua, el aire y el suelo en la zona circundante, a fin de verificar que los sistemas estén contribuyendo a la reducción de impactos ambientales. Específicamente, se medirán las concentraciones de gases de efecto invernadero como el metano, que puede ser producido durante el proceso de digestión anaeróbica, y se compararán los resultados con los estándares ambientales previos a la implementación del sistema. Este monitoreo también incluirá la evaluación de la calidad del agua residual, para

asegurar que las tecnologías instaladas están funcionando adecuadamente para tratar y purificar las aguas Ramón, Romero y Simanca (2006).

El biogás es una mezcla de gases que se produce durante la digestión anaeróbica de materia orgánica (Botero y Preston, 1987), como estiércol y desechos orgánicos, tales como restos de alimentos y vegetales no consumidos. Este gas tiene una composición química variable, pero el componente predominante es el metano (CH_4), un gas de efecto invernadero que representa una fuente significativa de energía renovable. La mezcla de metano con el aire es combustible y produce una llama azul cuando se quema (Cepero et al., 2012). Según los estudios realizados, la producción de biogás es un proceso eficiente que permite aprovechar los residuos orgánicos generados en las unidades porcinas y convertirlos en energía, lo que ayuda a reducir la dependencia de fuentes de energía no renovables.

Composición del Biogás

El biogás producido a partir de residuos orgánicos, como el estiércol de cerdo, está compuesto principalmente por metano (CH_4), que representa entre el 40% y el 70% de su composición. Además, contiene otros componentes como el dióxido de carbono (CO_2), el hidrógeno (H_2), el nitrógeno (N_2), el monóxido de carbono (CO) y el sulfuro de hidrógeno (H_2S), los cuales pueden ser perjudiciales si no se gestionan correctamente Soria, et al. (2001). La tabla 1 muestra la composición química típica del biogás producido en un digestor anaeróbico:

Tabla 14: Composición química del Biogás.

Componente	Fórmula	Porcentaje
Metano	CH_4	40-70%
Dióxido de Carbono	CO_2	30-60%
Hidrógeno	H_2	0.1%

Componente	Fórmula	Porcentaje
Nitrógeno	N ₂	0.1%
Monóxido de Carbono	CO	0.1%
Oxígeno	O ₂	0.1%
Sulfuro de hidrógeno	H ₂ S	0.1%

Fuente: Cepero, Sabrán, Díaz, Palacios, "Producción de biogás y bioabonos a partir de efluentes de biodigestores" (2012).

Parámetros Clave en el Proceso de Digestión Anaeróbica

El proceso de digestión anaeróbica, como el que ocurre en los biodigestores, depende de varias variables cruciales. Entre las más significativas, se destaca la relación carbono-nitrógeno (C/N). La relación C/N refleja las proporciones relativas de carbono y nitrógeno en los residuos orgánicos, y se considera que una proporción óptima se encuentra entre 16:1 y 25:1. Un incremento excesivo en la relación C/N puede dificultar la producción de biogás, ya que las bacterias encargadas de descomponer la materia orgánica utilizan primero el nitrógeno disponible, lo que reduce la eficiencia del proceso (Cepero et al., 2012). La temperatura, el pH, y el tamaño de las partículas son también factores determinantes en la velocidad y efectividad del proceso de digestión (Filipezak et al., 2023).

Selección del Sistema de Tratamiento: Biodigestor Tubular

En el tratamiento de los residuos orgánicos generados en la unidad porcina, se propone la instalación de un biodigestor tubular Pedraza, Chará, Conde (2002). Este sistema está compuesto por dos mangas de plástico o polietileno concéntricas, con tubos de entrada y salida para la recolección del biogás y el líquido digerido. El biodigestor tubular se entierra parcialmente en el suelo para garantizar la retención de la fase líquida dentro de una zanja previamente excavada. Este sistema es

especialmente útil por su bajo costo, facilidad de instalación y bajo mantenimiento, siendo adecuado para entornos rurales donde se disponga de materiales locales para su construcción (Arias et al., 2015). La instalación de un biodigestor tubular es una solución económica y eficiente para la gestión de los residuos orgánicos en la granja porcina.

Proceso de Digestión Anaeróbica: Etapas y Factores Biológicos

El proceso de digestión anaeróbica se lleva a cabo en cuatro etapas principales: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis Guevara (1996). En la etapa de hidrólisis, las bacterias hidrolíticas y fermentativas descomponen los compuestos complejos, como celulosa, proteínas y grasas, en compuestos más simples como azúcares, aminoácidos y ácidos grasos (Parra et al., 2019). En la acidogénesis, estos compuestos solubles se fermentan en ácidos grasos volátiles, dióxido de carbono e hidrógeno. En la etapa de acetogénesis, las bacterias acetogénicas transforman estos productos en acetato e hidrógeno, los cuales son utilizados por las bacterias metanogénicas para producir metano en la etapa metanogénica (Parra et al., 2019).

Pretratamiento y Eficiencia del Biodigestor

El pretratamiento térmico y químico de los residuos orgánicos es esencial para acelerar el proceso de digestión anaeróbica. El pretratamiento térmico, mediante el uso de temperaturas mesofílicas (30-42°C), mejora la hidrolización de los residuos, mientras que el pretratamiento químico, mediante la adición de productos como soda cáustica o cal apagada, descompone los compuestos complejos y aumenta la producción de biogás. Estos tratamientos no solo aceleran el proceso de digestión, sino que también incrementan la eficiencia de la producción de metano (Cepero et al., 2012). La temperatura de operación es un factor clave en la eficiencia del biodigestor, ya que una temperatura constante y adecuada asegura que los microorganismos metanogénicos actúen de manera óptima.

La etapa hidrolítica es a menudo el proceso limitante de la velocidad global de la digestión anaeróbica, especialmente cuando se tratan residuos con un alto contenido de sólidos. El proceso de hidrólisis depende de diversos factores, tales como la temperatura del proceso, el tiempo de retención hidráulica, y la composición bioquímica del sustrato, que incluye el porcentaje de lignina, carbohidratos, proteínas y grasas. Además, el tamaño de las partículas, el nivel de pH, la concentración de amonio (NH_4^+) y la concentración de los productos generados durante la hidrólisis también juegan un papel crucial en la eficiencia de esta etapa.

Durante la etapa fermentativa o acidogénica, las moléculas orgánicas solubles se fermentan en compuestos que pueden ser utilizados directamente por las bacterias metanogénicas. Estos compuestos incluyen ácido acético, ácido fórmico y hidrógeno (H_2), así como ácidos orgánicos más reducidos como el ácido propiónico, butírico, valérico, láctico y etanol Hilbert (2003). Estos últimos deben ser posteriormente oxidados por las bacterias acetogénicas en la siguiente fase del proceso, lo que permite su conversión en sustratos aptos para la producción de metano.

En la etapa acetogénica, algunos productos derivados de la fermentación, como el H_2 y el ácido acético, pueden ser metabolizados directamente por las bacterias metanogénicas. Sin embargo, otros productos como el etanol, los ácidos grasos volátiles y ciertos compuestos aromáticos, requieren ser transformados en productos más simples, como acetato (CH_3COO^-) e hidrógeno (H_2), mediante la acción de las bacterias acetogénicas. Ejemplos representativos de microorganismos acetogénicos incluyen *Syntrophomonas wolfei* y *Syntrophobacter wolini*, los cuales desempeñan un papel clave en la conversión de estos compuestos más complejos (Acevedo, 2006)

La etapa metanogénica es la fase final del proceso de digestión anaeróbica, en la cual los microorganismos metanogénicos producen metano a partir de sustratos con uno o dos átomos de carbono, como el acetato, H_2/CO_2 , formato, metanol y algunas

metilaminas. Los organismos metanogénicos pertenecen al dominio *Archaea* y se distinguen de otros procariotas por varias características comunes. Dentro de los metanógenos, se pueden identificar dos grandes grupos según el sustrato principal que metabolizan: los hidrogenotróficos, que consumen H₂/CO₂ y ácido fórmico, y los acetoclásticos, que consumen acetato, metanol y algunas aminas. Estos microorganismos son esenciales para la producción de metano en el proceso de digestión anaeróbica

Pretratamiento térmico

La aplicación de calor puede descomponer residuos orgánicos complejos en constituyentes más simples su y biodegradables. Este proceso influye especialmente en la etapa de hidrólisis, que provoca aceleración, el proceso de DA es altamente sensible a los cambios bruscos de temperatura, por lo tanto, una vez definido el nivel de temperatura de operación, se debe procurar mantenerlo constante. Los diferentes niveles son psicrófilico (< 25°C), mesófilico (25-45°C) y termófilico (45-70°C). la tabla siguiente, muestra una relación directa de la temperatura con el tiempo de retención hidráulico promedio.

Tabla 15: Relación del tiempo de retención hidráulica de función de la temperatura.

Estado Térmico	Temperatura de operación	Tiempo de retención mínimo
Psicrófilico	< 20 °C	70 – 80 días
Mesófilico	30 – 42 °C	30 – 40 días
Termófilico	43 – 55 °C	15 – 20 días

Fuente: Parra, Botero, Botero, Biomasa residual pecuaria: revisión sobre la digestión anaerobia como método de producción de energía y otros subproductos, 2019.

El diseño de un biodigestor como medida para el manejo del estiércol en una granja porcícola tiene un gran potencial para optimizar la gestión de residuos, reducir el impacto ambiental y generar energía renovable. Los biodigestores anaeróbicos, como el tipo taiwanés o balón plástico, son adecuados para estas instalaciones debido a su capacidad para procesar grandes volúmenes de estiércol y generar biogás. A continuación se presentan algunas recomendaciones clave para el diseño y operación de un biodigestor en este contexto.

Cálculo de la Producción de Estiércol

El primer paso en el diseño de un biodigestor es determinar la cantidad de estiércol que se genera en la granja. Esto depende de varios factores, como el número de animales, el tipo de sistema de producción y la cantidad de estiércol producido por cerdo. Un ejemplo práctico implica calcular la producción diaria de estiércol considerando las diferentes fases de la vida del cerdo (cría, levante y engorde). Para una granja de cría, por ejemplo, se debe calcular el número de cerdos y la cantidad de estiércol que cada uno produce diariamente, ajustado por el porcentaje de remoción de sólidos .

Dimensionamiento del Biodigestor

Una vez conocida la cantidad de estiércol a tratar, se debe proceder con el cálculo del volumen necesario para el biodigestor. Este cálculo debe tener en cuenta el volumen de estiércol y el agua de lavado generada en las operaciones diarias. En un ejemplo de una granja de cría, se calcularía el volumen de estiércol más agua en función de la cantidad de animales y el consumo de agua, lo que determina la capacidad total del biodigestor. El volumen total de residuos a tratar se multiplica por un factor de retención hidráulica (generalmente 25 días), lo que da como resultado el tamaño del biodigestor, que puede variar dependiendo de la fase de producción .

Diseño de la Estructura del Biodigestor

El biodigestor debe ser diseñado para garantizar una digestión anaeróbica eficiente. El modelo más común para granjas porcinas es el biodigestor tipo taiwanés, que se caracteriza por su estructura flexible, compuesta por una doble bolsa de plástico. Este tipo de biodigestor es eficaz para generar biogás, principalmente metano, a partir de la descomposición de la materia orgánica contenida en el estiércol . El diseño debe incluir una válvula de seguridad para la salida de gas, una trampa para el agua condensada y un filtro ácido para proteger el sistema de posibles obstrucciones.

Consideraciones Ambientales y Operativas

Además del diseño físico del biodigestor, es crucial considerar factores ambientales como la ubicación y la topografía de la granja. El biodigestor debe estar ubicado en una zona con buena ventilación, lejos de fuentes de agua para evitar la contaminación. Además, es necesario tener en cuenta la temperatura ambiente, ya que la digestión mesofílica (entre 33° y 45°C) es la más utilizada para este tipo de procesos .

El control de los residuos post-proceso también es importante. El efluente del biodigestor, que se compone de material no completamente descompuesto, puede ser utilizado como fertilizante para los cultivos. Es vital asegurar que este material sea manejado adecuadamente para evitar la contaminación del medio ambiente .

Energía y Aprovechamiento del Biogás

Una de las principales ventajas de instalar un biodigestor es la generación de biogás, que puede ser utilizado como fuente de energía renovable. El biogás producido, compuesto principalmente por metano (CH_4), puede ser aprovechado para generar electricidad o calefacción, lo que no solo mejora la sostenibilidad de la granja, sino que también reduce la dependencia de fuentes externas de energía. La

cantidad de biogás generada depende del tipo de residuos y de las condiciones operativas del biodigestor .

Cálculo de la Producción de Biogás y Dimensionamiento del Biodigestor

Para calcular la producción diaria de biogás en la unidad porcina, se toma en cuenta la cantidad de biomasa diaria generada por cada animal. Según los datos proyectados en la tabla 16, la unidad porcina con 140 animales genera un total de 360,90 kg de excremento diario, lo que requiere un biodigestor con un volumen adecuado para manejar esta biomasa. Con un tiempo de retención hidráulica de 35 días y una producción promedio de 0,044 m³ de biogás por cerdo, se estima que la unidad generará aproximadamente 15,88 m³ de biogás diario (Cepero et al., 2012). Este biogás puede ser utilizado para generar energía renovable, lo que reduce los costos energéticos de la unidad porcina y minimiza el impacto ambiental de los residuos orgánicos.

Tabla 16: Calculo de masa media.

FUENTE DE MATERIA PRIMA	NÚMERO DE ANIMALES	MASA MEDIA (KG)
LECHONES	120	50
HEMBRA	12	90
HEMBRA LACTACIÓN	5	110
SEMENTAL	3	130
TOTAL	140	

Fuente: Autor.

A partir de esta tabla, se puede proyectar que, por cada 50 kg de peso vivo de un animal, se generan aproximadamente 2,25 kg de excremento por día. Esta cantidad de excreta es crucial para el cálculo de la biomasa diaria generada (Bmd), la cual se utiliza para determinar el volumen de residuos que debe ser procesado en el biodigestor. La biomasa generada depende directamente de la cantidad de animales, su peso promedio y las características del proceso de producción.

Proyección de Biomasa Para Digerir

La biomasa para digerir se estima tomando en cuenta la cantidad de excreta generada, y la fracción de agua necesaria para asegurar la adecuada digestión anaeróbica. Según los cálculos realizados, se obtiene la siguiente proyección de la biomasa a digerir por cada tipo de animal:

Tabla 17: Determinación de biomasa a digerir

Fuente de Materia Prima	Número de Animales	Masa Media (Kg)	BMD (Kg/día)	Biomasa Por Digerir (m³/día)
Lechones	120	50	270,00	1,08
Hembra	12	90	48,60	0,19
Hembra Lactación	5	110	24,75	0,10
Semental	3	130	17,55	0,07
Total	140		360,90	1,44

Fuente: Autor

Para el cálculo del volumen del biodigestor, se tiene en cuenta el volumen total de biomasa a digerir y el tiempo de retención, según lo indicado en la tabla 2, el tiempo tomado para el cálculo del volumen del sistema del biodigestor, se toma un TRH de 35 días, por lo que el volumen del sedimentador es:

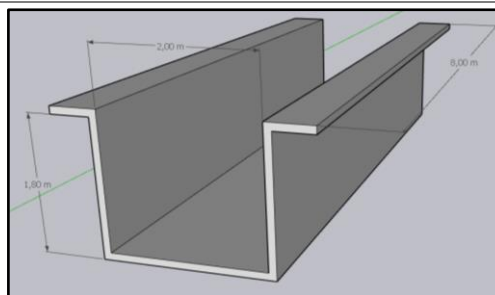
Tabla 18 : Calculo de Volumen del Biodigestor

Fuente de Materia prima	Número de Animales	Masa Media Kg	BMD Kg/día	Biomasa por digerir m3/día	Volumen del biodigestor m3
Lechones	120	50	270,00	1,08	50,53
Hembra	12	90	48,60	0,19	
Hembra Lactación	5	110	24,75	0,10	
Semental	3	130	17,55	0,07	
Total	140		360,90	1,44	

Fuente: Autor

Tabla 19: Dimensionamiento de zanja de soporte de Biodigestor

Dimensionamiento de zanja de soporte de biodigestor		
Forma de la Zanja	Rectangular	
Material	Concreto	
Largo de Zanja	8,00	m
Ancho de Zanja	2,00	m
Alto de Zanja	1,60	m
Volumen de zanja	25,60	m ³



Fuente: Autor

Un parámetro muy difícil de definir es el pH, ya que los diferentes tipos de bacterias presentes en el cervecero requieren o prefieren diferentes pH para un rendimiento óptimo. manteniendo un óptimo El pH de todos los microorganismos presentes en un mismo reactor es una tarea difícil, y más aún complicado si el sustrato tiene diferentes composiciones de nutrientes.

Tabla 20: Estimación de producción diaria de Biogás, a partir del BMD

Fuente de Materia prima	Animal	Masa Media Kg	BMD Kg/día	Tiempo de Retención Día	Rendimiento del Biogás por especie porcina	Volumen diario de Biogás m ³ /día
Lechones	120	50	270,00	35	0,044	15,88
Hembra	12	90	48,60			
Hembra Lactación	5	110	24,75			
Semental	3	130	17,55			
Total	140		360,90			

Fuente: Autor

Dimensionamiento del Biodigestor

El dimensionamiento del biodigestor se basa en la cantidad total de biomasa a digerir y en el tiempo de retención hidráulico (TRH), que es el tiempo que tarda el residuo orgánico en permanecer dentro del biodigestor antes de ser completamente procesado. Para este proyecto, se ha estimado un TRH de 35 días, lo que significa que el sistema debe estar diseñado para manejar la biomasa generada durante este período. Con base en esta estimación, el volumen del biodigestor necesario para procesar la biomasa generada es el siguiente:

Tabla 21: Calculo de volumen de biodigestor.

Fuente de Materia Prima	Número de Animales	Masa Media (Kg)	BMD (Kg/día)	Biomasa Por Digerir (m ³ /día)	Volumen del Biodigestor (m ³)
Lechones	120	50	270,00	1,08	50,53
Hembra	12	90	48,60	0,19	
Hembra Lactación	5	110	24,75	0,10	
Semental	3	130	17,55	0,07	
Total	140		360,90	1,44	50,53

Fuente: Autor

La capacidad del biodigestor está determinada por la cantidad de biomasa a digerir y el tiempo de retención, con lo que se garantiza que el proceso de digestión anaeróbica sea eficiente para producir biogás.

Por su parte UNAL (2009), entrego unas recomendaciones técnicas para el diseño de biodigestores los cuales incluyen diversos aspectos fundamentales que aseguran la eficiencia y el buen funcionamiento del sistema. A continuación, se presentan las principales pautas y consideraciones:

Selección de la materia prima: La calidad y el tipo de materia orgánica son factores cruciales para el diseño de un biodigestor. El estiércol de cerdo, vacuno, o residuos agrícolas son los más comunes. Estos materiales contienen la cantidad necesaria de sólidos volátiles que permitirán una adecuada fermentación anaeróbica. La elección debe basarse en la disponibilidad local y la relación C/N (carbono/nitrógeno), que idealmente debe estar entre 20:1 y 30:1 para promover una eficiente producción de biogás. La relación C/N es importante ya que los microorganismos encargados de la digestión anaeróbica necesitan una proporción adecuada de carbono y nitrógeno para su crecimiento.

Importancia del pH: El pH dentro del biodigestor es otro factor crucial en el proceso de digestión anaeróbica. Las bacterias metanogénicas, responsables de la producción de biogás, son sensibles a los cambios en el pH. Un pH demasiado bajo puede inhibir su actividad, mientras que un pH demasiado alto puede reducir la eficiencia del proceso. Se recomienda mantener el pH en un rango de 6.5 a 7.5, que es el rango óptimo para la actividad bacteriana. Si el pH cae por debajo de 6.0, el proceso puede volverse ineficaz y se puede generar un ambiente ácido perjudicial para las bacterias.

Temperatura y tiempo de retención: La temperatura dentro del biodigestor influye directamente en la actividad microbiana y, por ende, en la eficiencia del proceso de fermentación. Los biodigestores pueden operar en tres rangos de temperatura: psicrófila (10-20°C), mesófila (20-35°C) y termófila (50-60°C). Sin embargo, se recomienda operar dentro del rango mesofílico, que proporciona un equilibrio adecuado entre la velocidad de la fermentación y la estabilidad del proceso. Además, el tiempo de retención es un factor importante, ya que determina el período durante el cual los materiales orgánicos permanecen dentro del biodigestor para ser completamente digeridos. En condiciones mesofílicas, un tiempo de retención ideal es de aproximadamente 20 días.

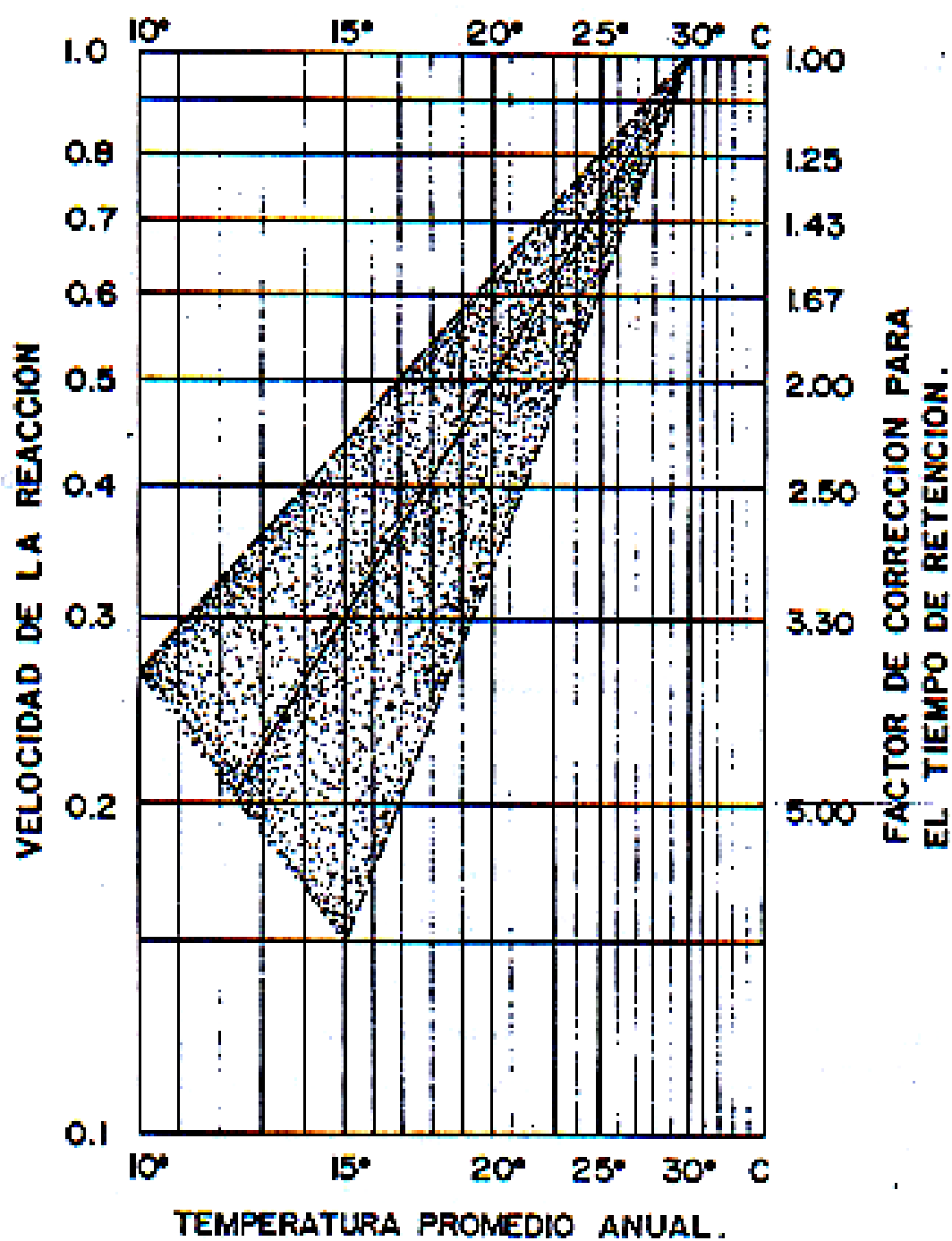


Figura 6: Influencia de la temperatura sobre el tiempo de retención [Vargas 1999].

El diseño de un biodigestor debe ser realizado de acuerdo con la cantidad de materia orgánica disponible y la cantidad de biogás que se espera generar. El biodigestor debe contar con un volumen adecuado para almacenar la biomasa durante el tiempo de retención. En este contexto, la cantidad de gas que se producirá depende directamente de la cantidad y tipo de material que se utilice en el sistema. Se recomienda calcular el volumen de gas a almacenar, lo que implica dimensionar adecuadamente el volumen de la cúpula o campana, así como el tanque de compensación. Un diseño subdimensionado puede llevar a la sobrecarga del sistema y a una menor producción de biogás.

El volumen de gas que debe ser almacenado dentro de un biodigestor depende de la carga orgánica disponible y la capacidad del sistema para almacenar el biogás. En el caso de un biodigestor de cúpula fija, el gas se almacena en una estructura rígida que permite la acumulación de gas a medida que se produce. Es importante que el biodigestor cuente con un volumen de gas suficiente para asegurar un suministro constante. Además, el diseño debe permitir la liberación controlada del gas para evitar la acumulación de presiones peligrosas dentro del sistema.

Para mantener la estabilidad en la producción de biogás y evitar fluctuaciones excesivas en la presión interna del biodigestor, se debe incluir un tanque de compensación. Este tanque permite almacenar el volumen adicional de biogás y líquidos durante la fermentación. El tamaño del tanque de compensación debe ser calculado en función del volumen de gas esperado y la capacidad de almacenamiento del biodigestor. Un tanque de compensación bien dimensionado ayuda a mantener un flujo constante de biogás y evita la acumulación de presión en el sistema.

Tipo de biodigestor: El tipo de biodigestor elegido dependerá de las condiciones específicas del lugar, como la temperatura ambiente y la disponibilidad de materiales. Los biodigestores de cúpula fija son adecuados para climas más fríos,

ya que su estructura subterránea ayuda a mantener una temperatura constante. Sin embargo, los biodigestores de campana flotante o balón plástico pueden ser más apropiados en climas cálidos debido a su simplicidad y menor costo de construcción. La elección del tipo de biodigestor también influye en los costos de instalación y mantenimiento.

Además de la producción de biogás, los biodigestores generan un efluente que puede ser utilizado como bioabono. Este efluente es rico en nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio, lo que lo convierte en un excelente fertilizante para suelos agrícolas. Se debe tener cuidado en el manejo del efluente para evitar su contaminación y garantizar que se utilice adecuadamente en la agricultura. La aplicación del bioabono debe ser controlada para no sobrecargar el suelo con nutrientes.

El biodigestor requiere un mantenimiento regular para garantizar su funcionamiento eficiente. Es importante verificar periódicamente la estanqueidad del sistema para evitar fugas de biogás, lo que podría comprometer la producción de energía. Además, el biodigestor debe ser monitoreado en cuanto a la temperatura, el pH y el tiempo de retención para asegurarse de que las condiciones sean las adecuadas para la fermentación anaeróbica. El manejo adecuado de la carga y la mezcla de materiales también es fundamental para evitar problemas como la acidificación o la baja producción de biogás.

En conclusión, el diseño adecuado de un biodigestor en una granja porcícola no solo ayuda a manejar eficientemente el estiércol, sino que también proporciona beneficios económicos y ambientales, como la reducción de olores y la generación de energía. Un diseño bien planificado, que considere la cantidad de estiércol, las condiciones ambientales y la optimización del proceso de digestión anaeróbica, puede transformar un desafío en una oportunidad para la sostenibilidad.

Según el presupuesto detallado para la construcción del manejo integral de residuos en la Unidad Porcina del Centro de Formación Agroindustrial La Angostura, ubicado en Campoalegre Huila, se describen los siguientes costos y actividades asociadas. El presupuesto incluye varias etapas, como los trabajos preliminares, los concretos y morteros, la instalación hidráulica y sanitaria, la construcción del biodigestor tubular, el sistema de extracción de biogás, y la adecuación de la laguna de estabilización. En total, se estima que el costo directo de la obra asciende a \$44.884.462, con un ajuste de administración de \$8.976.892, y una utilidad de \$2.244.223. La suma total del costo, incluyendo el IVA del 19% sobre la utilidad, alcanza \$56.531.980.

Este presupuesto es una estimación detallada para cada fase de la construcción, abarcando desde la localización y replanteo manual hasta la instalación de sistemas hidráulicos y la construcción del biodigestor, con un enfoque integral en la gestión de residuos y la optimización del proceso de extracción de biogás. Cada capítulo incluye los costos unitarios de las actividades, la cantidad de unidades necesarias y los valores totales de cada una, lo que facilita el cálculo preciso de los costos asociados a la obra en su conjunto.

Tabla 22: Determinación del valor del manejo de residuos

MANEJO INTEGRAL DE RESIDUOS PARA UNIDAD PORCINA DEL CENTRO DE FORMACIÓN AGROINDUSTRIAL LA ANGOSTURA, CAMPOALEGRE HUILA					
1	PRELIMINARES	UND	Valor Unitario	Cantidad	Valor Total
1,1	Localización y replanteo manual.	M2	\$ 9.818	60,00	\$ 589.085
1,2	Descapote y excavación manual a todo factor (Incluye cargue y transporte).	M3	\$ 42.400	38,00	\$ 1.611.200
1,3	Nivelación y lleno compactado con material del sitio e=40 cm.	M2	\$ 29.769	38,00	\$ 1.131.218
SUBTOTAL CAPITULO					\$ 3.331.503
2	CONCRETOS Y MORTEROS				

2,1	Placa de concreto reforzado de 3000 psi, con espesor de 30 cm, con malla electrosoldada de hueco 0,15.	M3	\$ 561.631	20,00	\$ 11.232.624
2,2	Loza de concreto de 9 cm, malla electrosoldada de hueco 0,15, acabado según modelos de diseño	M2	\$ 561.678	15,00	\$ 8.425.168
SUBTOTAL CAPITULO					\$ 19.657.792
3	INSTALACIÓN HIDRAULICA Y SANITARIA				
3,1	Instalación de Red Sanitaria de desagüe PVC 4", incluye accesorios de conexión, Te, Codos, Uniones y Demás	M	\$ 35.000	30,00	\$ 1.050.000
3,2	Instalación de red de abastecimiento de agua potable PVC de 1/2", incluye accesorios de instalación y llave terminales	M	\$ 17.500	45,00	\$ 787.500
SUBTOTAL CAPITULO					\$ 1.837.500
4	CONSTRUCCIÓN DE BIODIGESTOR TUBULAR				
4,1	Construcción de Biodigestor Tubular en membrana PEAD 300 µm de espesor, incluye accesorios de instalación y acoples de ingreso y salida del agua recirculada	M3	\$ 245.000	38,00	\$ 9.310.000
SUBTOTAL CAPITULO					\$ 9.310.000
5	INSTALACIÓN DE SISTEMA DE EXTRACCIÓN DE BIOGAS				
5,1	Instalación de sistema de extracción de Biogás, incluye: Tubería Flex de PVC de 1", Tubería de PVC de ½", Niple de 10 cm y 1", Válvula de bola de PVC de 1", Abrazaderas metálicas de 1", Codos de PVC de 1" a 90°, Adaptador hembra de PVC de 1", Adaptador macho de PVC de 1",	M	\$ 14.500	50,00	\$ 725.000

	Adaptador macho de PVC de ½", Bushing de PVC de 1" a ½"				
	SUBTOTAL CAPITULO				\$ 725.000
6	ADECUACIÓN DE LAGUNA DE ESTABILIZACIÓN				
6,1	Descapote y excavación manual a todo factor (Incluye cargue y transporte).	M3	\$ 42.400	29,00	\$ 1.229.600
6,2	Nivelación y lleno compactado con material del sitio e=40 cm.	M2	\$ 29.769	30,00	\$ 893.067
6,3	Instalación de geomembrana doble de alta resistencia en el área establecida para la laguna de estabilización.	M2	\$ 120.000	60,00	\$ 7.200.000
6,4	Instalación de Red Sanitaria de desagüe PVC 4", incluye accesorios de conexión, Te, Codos, Uniones y Demás	M	\$ 35.000	20,00	\$ 700.000
	SUBTOTAL CAPITULO				\$ 10.022.667
	COSTO DIRECTO TOTAL				\$ 44.884.462
		ADM	20%		\$ 8.976.892
	A.I.U.	IMP	0%		\$ -
		U	5%		\$ 2.244.223
	TOTAL A.U.		25%		\$ 11.221.115
	COSTO DIRECTO + A.I.U.				\$ 56.105.577
	I.V.A. DEL 19% SOBRE LA UTILIDAD		19%		\$ 426.402
	COSTO TOTAL				\$ 56.531.980

Fuente: Autor.

La fase de implementación y evaluación del sistema de manejo de residuos se ha llevado a cabo con éxito gracias a un enfoque integral que abarca desde la capacitación del personal hasta la instalación de tecnologías sostenibles. El entrenamiento intensivo del personal ha sido clave para asegurar que todas las nuevas prácticas y tecnologías, como los sistemas de digestión anaeróbica y compostaje, se comprendieran y aplicaran correctamente, lo que garantizará una operación eficiente del sistema de manejo de residuos. Esta capacitación ha

asegurado que los operarios, técnicos y gestores comprendan la importancia de cada acción dentro del sistema y su impacto ambiental, estableciendo una cultura organizacional comprometida con la sostenibilidad.

Además, la implementación efectiva del sistema de manejo de residuos ha permitido la integración de las tecnologías seleccionadas, lo que ha facilitado el tratamiento y aprovechamiento de los residuos generados por la unidad porcina. Con la instalación de los biodigestores anaeróbicos, los sistemas de compostaje y los humedales artificiales, se ha logrado un manejo eficiente de los residuos orgánicos y líquidos, generando beneficios no solo para la unidad porcina, sino también para el entorno circundante. El proceso de monitoreo y evaluación continúa, garantizando que el sistema cumpla con los estándares ambientales establecidos y que se logre una mejora continua en la reducción de impactos negativos, como la contaminación del agua, aire y suelo.

8. IMPACTO SOCIAL Y HUMANÍSTICO

El impacto social de la implementación del sistema de manejo integral de residuos en la unidad porcina del Centro de Formación Agroindustrial ha sido significativo, especialmente en las comunidades circundantes. La gestión adecuada de los residuos no solo contribuye a la protección del medio ambiente, sino que también ha tenido un efecto positivo en la calidad de vida de las personas que habitan en la zona. Al reducir los niveles de contaminación del agua y del aire, se ha mejorado la salud pública de la región, disminuyendo los riesgos de enfermedades relacionadas con la mala calidad del agua y la exposición a contaminantes atmosféricos. Este beneficio indirecto ha sido clave para fortalecer la relación entre la unidad porcina y la comunidad local, creando una imagen de responsabilidad social y ambiental.

Desde un enfoque humanístico, el proyecto ha promovido la formación ética y profesional de los estudiantes del Centro de Formación Agroindustrial, quienes han tenido la oportunidad de aprender y aplicar tecnologías innovadoras para la gestión de residuos. Al involucrar a los estudiantes en este proceso, el centro no solo los ha capacitado técnicamente, sino que también ha fomentado un sentido de responsabilidad social y ambiental que perdurará en sus carreras profesionales. La educación en prácticas sostenibles forma parte integral de la formación integral que ofrece el centro, asegurando que los futuros líderes y profesionales en el ámbito agroindustrial comprendan la importancia de la sostenibilidad en sus actividades.

El proyecto ha contribuido a la inclusión social al generar nuevas oportunidades laborales y de formación en la región. Al implementar nuevas tecnologías y sistemas para el tratamiento de residuos, como el biodigestor anaeróbico y los humedales artificiales, se ha impulsado la creación de empleo en la zona. Las personas involucradas en la operación y mantenimiento de estos sistemas han adquirido habilidades técnicas especializadas, lo que les permite mejorar sus condiciones laborales y contribuir al desarrollo económico local. Este enfoque en la capacitación técnica también facilita la movilidad laboral de los trabajadores, quienes ahora

tienen la posibilidad de acceder a un mercado laboral más competitivo en el sector agroindustrial.

Además, el proyecto ha tenido un efecto positivo en la cohesión social de las comunidades involucradas. Al involucrar a la comunidad local en el proceso de implementación y seguimiento de las prácticas sostenibles, se ha logrado fortalecer el sentido de pertenencia y colaboración entre la unidad porcina y sus vecinos. La participación de la comunidad en la conservación del medio ambiente y la implementación de soluciones prácticas, como el compostaje y el tratamiento de aguas residuales, ha creado un modelo de cooperación que puede ser replicado en otras regiones. Esta colaboración ha reforzado el vínculo entre las partes interesadas y ha promovido un modelo de desarrollo rural basado en la sostenibilidad y el bienestar común.

El impacto social y cultural del proyecto también ha sido significativo al integrar los conocimientos tradicionales de la comunidad con las nuevas tecnologías. A través de talleres y actividades formativas, los miembros de la comunidad han aprendido a valorar la relación entre los recursos naturales, la agricultura sostenible y la producción responsable. Esta integración de saberes ha fortalecido la conciencia ambiental en la comunidad y ha motivado a los habitantes a adoptar prácticas más sostenibles en sus propias actividades agropecuarias. Esta fusión de conocimientos ha creado una cultura local más respetuosa con el medio ambiente y más consciente de la importancia de manejar adecuadamente los recursos naturales.

Finalmente, el proyecto ha tenido un efecto multiplicador, ya que la unidad porcina del Centro de Formación Agroindustrial se ha convertido en un referente para otras unidades productivas en la región y más allá. Al demostrar que es posible implementar prácticas sostenibles sin comprometer la rentabilidad, el proyecto ha servido como modelo para otros productores que buscan soluciones innovadoras para la gestión de residuos. Este efecto de replicabilidad ha permitido que el conocimiento y las buenas prácticas se diseminen, promoviendo un cambio cultural

más amplio hacia la sostenibilidad en el ámbito agroindustrial. A través de este modelo, se espera que más comunidades rurales puedan beneficiarse de tecnologías limpias y prácticas responsables que contribuyan al bienestar social y ambiental en toda la región.

9. CONCLUSIONES

La correcta proyección de la biomasa diaria generada y el dimensionamiento adecuado del biodigestor son cruciales para garantizar la eficiencia del sistema de tratamiento de residuos. Con los datos recopilados y las proyecciones realizadas, se puede afirmar que la implementación de un sistema de digestión anaeróbica optimizará la gestión de los residuos orgánicos generados por la unidad porcina, contribuyendo a la producción de biogás como fuente de energía renovable y a la reducción de los impactos ambientales derivados de la actividad porcina.

La implementación de un biodigestor anaeróbico en la unidad porcina ha demostrado ser una estrategia efectiva para la gestión de residuos orgánicos, transformando estiércol y otros desechos en biogás y fertilizantes orgánicos. Este proceso contribuye significativamente a la reducción de la contaminación ambiental, al disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, como el metano, y mejorar la calidad del agua y del aire en las áreas circundantes. La integración de esta tecnología ha logrado optimizar la sostenibilidad operativa de la unidad porcina.

El proyecto de manejo de residuos sólidos ha permitido un cumplimiento más estricto de las normativas ambientales vigentes, especialmente las relacionadas con la calidad del agua y la reducción de la contaminación atmosférica y del suelo. Con la implementación del biodigestor y otras tecnologías complementarias, como el compostaje, se han alcanzado los parámetros exigidos por la Resolución 1207 de 2014, contribuyendo a la preservación de los recursos naturales y la mejora de la salud pública en la zona.

El biogás producido por el biodigestor no solo permite una mejor gestión de residuos, sino que también ha proporcionado una fuente alternativa de energía renovable para las operaciones de la unidad porcina. Este aprovechamiento energético ha reducido la dependencia de combustibles fósiles, contribuyendo a la

autonomía energética de la unidad, lo que representa un avance hacia la sostenibilidad energética y la reducción de costos operativos.

La capacitación y sensibilización del personal del centro han sido claves para asegurar la correcta implementación del sistema de manejo de residuos. Este enfoque educativo ha permitido que los operarios y estudiantes del Centro de Formación Agroindustrial La Angostura adquieran conocimientos prácticos en la gestión de residuos, fortaleciendo la formación profesional en prácticas sostenibles. La experiencia adquirida en este proyecto servirá como modelo replicable para otras unidades productivas en la región.

La gestión adecuada de los residuos orgánicos ha tenido un impacto directo en la mejora de las condiciones ambientales locales. La reducción de la contaminación en los cuerpos de agua cercanos y la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero han reducido los riesgos para la salud pública, mejorando la calidad del aire y del agua en la región. Este resultado subraya la importancia de implementar prácticas de manejo de residuos que no solo benefician a las unidades productivas, sino que también protejan la biodiversidad y la salud de las comunidades circundantes.

10.RECOMENDACIONES

Es esencial mantener programas de formación periódica para los trabajadores de la unidad porcina, enfocados no solo en el manejo de residuos, sino también en el uso y mantenimiento adecuado de las tecnologías implementadas. Esto garantizará una correcta aplicación de los procedimientos operativos y asegurará la sostenibilidad a largo plazo del sistema de manejo de residuos.

Si bien los sistemas de digestión anaeróbica, compostaje y humedales artificiales han demostrado ser efectivos, es recomendable explorar e implementar nuevas tecnologías que permitan una mayor eficiencia en la conversión de residuos en biogás o fertilizantes orgánicos. La investigación y adaptación de tecnologías emergentes pueden contribuir a una gestión aún más eficiente y reducir el impacto ambiental de la unidad.

Para garantizar la efectividad del sistema de manejo de residuos, se debe implementar un sistema de monitoreo continuo que evalúe no solo la calidad del agua, aire y suelo, sino también los parámetros operativos de los biodigestores y otras tecnologías instaladas. Este monitoreo debe estar acompañado de análisis periódicos que permitan hacer ajustes oportunos en las prácticas de manejo.

Es recomendable realizar una evaluación continua del impacto ambiental a largo plazo del sistema de manejo de residuos para poder medir los beneficios tangibles de la implementación. Estos estudios de impacto deben centrarse en los efectos sobre la biodiversidad local, la calidad de los recursos hídricos y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

Para seguir mejorando el sistema de manejo de residuos, se debe incentivar la investigación y la innovación en la gestión de residuos en la unidad porcina. Esto puede incluir la búsqueda de nuevos métodos de tratamiento o la mejora de los sistemas existentes, lo que asegurará que la unidad continúe siendo un referente en prácticas agroindustriales sostenibles.

BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo, P. (2006). Biodigestor de doble propósito – producción e investigación – para residuos de granja porcícola. *Revista ION*, 19(1), 1-6, Diciembre.
- Aguilar, F.X., Botero, R. (2006). Los beneficios económicos totales de la producción de biogás utilizando un biodigestor de polietileno de bajo costo. *Tierra Tropical*, 2(1), 15-
- Alvarez Valencia, L., García Reyes, R., Ulloa Mercado, G., et al. (2020). Potencial biotecnológico para la valorización de residuos generados en granjas porcinas y cultivos de trigo. *Scielo*.
- Álvarez, J.M., Caneta, L., Moyano, C. (sf). Biomasa y biogás. Trabajo de Curso (Máquinas Térmicas II). Universidad Nacional del Nordeste.
- Arias, S., Lopez, A., & Hernandez, P. (2015). Propuesta tecnológica para el aprovechamiento energético del bagazo de cebada malteada. *Hatuey Brewery*.
- Arias, V., López, M., & Rodríguez, A. (2015). Propuesta tecnológica para el aprovechamiento energético del bagazo de cebada malteada de la cervecería Hatuey. *Revista de Ingeniería*.
- Beckman, J., Campero, O., Florido, E., Ortiz, I. (2007). Viviendas autoenergéticas para las aldeas rurales de Bolivia. *Coloquio Ciencia y Tecnología para el Desarrollo*, Granada.
- Botero, R., Preston, T.R. (1987). Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas. Manual para su instalación, operación y utilización. Escuela de Agricultura de la Región Tropical Húmeda.
- Cacua Angarita, K. D. (2025). Factores ambientales y su influencia en la epidemiología de la cisticercosis en Colombia: revisión sistemática de literatura.
- Castro, L., Parrales, H., Escalante, Y., & Botero, M. (2019). Co-digestión anaerobia de estiércoles bovino, porcino y equino como alternativa para mejorar el potencial energético en digestores domésticos. *Revista Ion*.

- Castro, L., Parrales, Y., & Escalante, H. (2019). Co-digestión anaerobia de estiércoles bovino, porcino y equino como alternativa para mejorar el potencial energético en digestores domésticos. *Revista Ion*.
- Cayuela, M. L., et al. (2015). Producción limpia en la agroindustria: tecnologías y prácticas sostenibles. Editorial Agroindustria. https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/13022/45152_61214.pdf
- Cepero, J., Savran, A., Díaz, L., & Palacios, R. (2012). Producción de biogás y bioabonos a partir de efluentes de biodigestores. *Pastos y forrajes*
- Cepero, M., Savran, A., Blanco, A., Díaz, L., & Pi. (2012). Producción de biogás y bioabonos a partir de efluentes de biodigestores. *Pastos y Forrajes*.
- Cepero, M., Savran, A., Díaz, L., & Palacios, J. (2012). Producción de biogás y bioabonos a partir de efluentes de biodigestores. *Pastos y Forrajes*.
- Corace, J.J., Aebhard, M.R., Martina, P.A., Ventín, A.M., García, E. (2006). Comparación del tiempo de reacción en el proceso de biodigestión según el tamaño de las partículas de aserrín utilizado como materia orgánica. *Comunicaciones Científicas y Tecnológicas*.
- EPA. (2020). *Methods for Chemical Analysis of Water and Wastes*. United States Environmental Protection Agency.
- FAO. (2016). *Manual de Buenas Prácticas de Gestión de Residuos*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Franco, J., et al. (2018). Biogás a partir de residuos porcinos: evaluación de la digestión anaerobia. *Revista de Energías Renovables*, 35(2), 45-56. <https://www.redalyc.org/pdf/3420/342052520008.pdf>
- Gómez, R., Viniegra, F. (1979). Uso de biogás y bioabono en la agricultura. *Revista Latinoamericana de Ciencias Ambientales*.
- González-Fernández, C., & García-Encina, P. (2009). El tratamiento de estiércol de cerdo mediante digestión anaerobia. *Tecnología en Biotecnología*, 12(1), 34-42. <https://revistas.usac.edu.gt/index.php/asa/article/view/1690>
- Guevara, A. (1996). Producción de biogás a partir de residuos orgánicos y su aprovechamiento energético. *Revista de Energía y Medio Ambiente*.

- Henao Sarmiento, J. E., Cárdenas Torres, M. A., & Fajardo Patiño, A. (2007). Zonificación Ambiental de la Zona de Reserva Forestal del Pacífico en Jurisdicción del Departamento de Córdoba, Caribe Colombiano. Colombia Forestal, 11(0). <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2008.1.a12>
- Hilbert, M. (2003). Consideraciones para el diseño y operación de biodigestores en la producción de biogás. Revista Científica, 28(2), 75-82.
- Jordán, M., et al. (2015). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales de actividades agropecuarias. Journal of Environmental Engineering, 45(3), 67-75. <https://www.redalyc.org/pdf/3420/342052520008.pdf>
- Martínez, M. (2015). Producción potencial de biogás empleando excretas de ganado porcino en el estado de Guanajuato. Nova Scientia.
- Martínez-Lozano, M. (2015). Producción potencial de biogás empleando excretas de ganado porcino en el estado de Guanajuato. Nova Scientia, 7(15). <https://doi.org/10.21640/ns.v7i15.273>
- McGarry, M., Stainforth, J. (1978). Compost, fertilizer and biogas production from human and farm wastes in the People's Republic China. IDRC, Ottawa, Canada.
- Olaya, Y. (2006). Diseño de un biodigestor de cúpula fija. Trabajo de Grado (Ingeniero Agrícola). Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira.
- Paolini, L., Petracchini, L., Segreto, G., Tomassetti, C., Naja, F., Ce, V., Valerio, L., Francesco, M., Marco, L., Nour, A. (2018). Impacto ambiental del biogás: una breve revisión del conocimiento actual. Revista de Ciencias Ambientales y Salud; Parte A.
- Parra, D., Botero, M., & Botero, J. (2019). Biomasa residual pecuaria: revisión sobre la digestión anaerobia como método de producción de energía y otros subproductos. Revista UIS Ingenierías.
- Pedraza, G., Chará, J., Conde, N., Giraldo, S., Giraldo, L. (2002). Evaluación de los biodigestores en geomembrana (PVC) y plástico de invernadero en clima medio para el tratamiento de aguas residuales de origen porcino. Fundación Centro de Investigaciones en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria – CIPAV.

- Perevochtchikova, M. (2017). La evaluación del impacto ambiental y la importancia de los indicadores ambientales. *Environmental Impact Assessment and the Importance of Environmental Indicators*.
- Pérez Brito, A. E., & Bojórquez Zapata, M. I. (2020). APLICACIÓN DEL MODELO DE LAS 5 FUERZAS EN EL SECTOR PORCINO EN YUCATÁN. *Hitos de Ciencias Económico Administrativas*, 25(72). <https://doi.org/10.19136/hitos.a25n72.3616>
- Pérez-Pérez, T., Pereda-Reyes, I., Oliva-Merencio, D., & Zaiat, M. (2016). Anaerobic digestion technologies for the treatment of pig wastes | Tecnologías de digestión anaerobia para el tratamiento de residuales Porcinos. *Cuban Journal of Agricultural Science*, 50(3).
- Pinos, J. M., García, C., Peña, J., Rendón, A., González, L., & Luz, C. (2012). Impactos y regulaciones ambientales del estiércol generado por los sistemas ganaderos de algunos países de América. *Scielo*.
- Pinos, J. M., García, L., Peña, G., Rendón, J. A., González, J. C., Luz, M. T., & Cecilia, R. (2012). Impactos y regulaciones ambientales del estiércol generado por los sistemas ganaderos de algunos países de América. *Scielo*.
- Posso, F. (2002). Energía y ambiente: Pasado, presente y futuro. Parte Dos: Sistema energético basado en energías alternativas. *Geoenseñanza*, 7(1-2), 54-73.
- Ramón, J.A., Romero, L.F., Simanca, J.L. (2006). Diseño de un biodigestor de canecas en serie para obtener gas metano y fertilizantes a partir de la fermentación de excrementos de cerdo. *Revista Ambiental: Aire, Agua y Suelo*, 1, 15-23.
- Robles-Gil, S. (2001). Información climatológica para la aplicación de la energía de la biomasa. Comisión de Climatología, Organización Meteorológica Mundial.
- Rodríguez, J., et al. (2011). Utilización de estiércol en la agricultura: prácticas y perspectivas. *Revista de Ciencias Agropecuarias*, 23(1), 21-29.
- Rodríguez, J., Sánchez, G. (2017). Evaluación ambiental de los usos potenciales de la porcinaza. *Lasalle Ciencia Ambiental*.

- Romero Borré, J., Escorcía Pérez, T., Rodelo Utría, H., & Gutiérrez Silva, J. M. (2020). Administración del ciclo de efectivo en pymes del sector porcino de Baranoa, departamento del Atlántico - Colombia. Tecnológico de Antioquia Institución Universitaria., 5.
- Sabogal, N., & Vargas, F. (2019). Priorización de oportunidades de producción más limpia. Recuperado de https://repositorio.unbosque.edu.co/bitstream/handle/20.500.12495/2153/Sabogal_Romero_Natalia_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Soria, F., Ferrera-Cerrato, R., Etchevers, B., Alcántar, G., Santos, J.T. (2001). Composición química del biogás y su uso como fuente de energía renovable. Revista de Energías Renovables.
- Torres, O. P., Barros, M., Núñez, S., & Rodríguez, A. (2019). Subproductos agrícolas, una alternativa en la alimentación de rumiantes ante el cambio climático. Scielo.
- UN (2020). Objetivos del desarrollo sostenible. Recuperado de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>.
- UNEP. (2014). Environmentally Sound Technologies for Waste Management. United Nations Environment Programme.
- Veterinaria Digital. (2022). El sector porcino en Colombia. 19/07/2022.