

Valorización del Digerido Producido en la Digestión Anaeróbica de los Residuos
Agroindustriales de una Granja Porcícola para el Mejoramiento del Cultivo de Pasto de
Corte Taiwán

Daiana Rocio Medina Medina

Henry Ariza Parra

Trabajo de Grado para optar por el título de Ingeniero Químico

Director

Humberto Escalante Hernández

Ingeniero Químico, PhD

Codirector

Alexander Muñoz Muñoz

Ingeniero Químico, MSc

Tutor

Nelson Facundo Rodríguez López

Licenciado en Biología y Química, PhD

Universidad Industrial De Santander
Facultad De Ingenierías Fisicoquímicas
Escuela De Ingeniería Química
Bucaramanga

2025

Dedicatorias

A mi madre, Sandra, quien siempre ha estado para mí y, a pesar de las situaciones y mis locuras, me ha permitido volar por mi propio camino sin dejar de apoyarme siempre que la necesito. A mi papá, Juan Ramón, quien desde pequeña me inspiró a ser ingeniera y siempre ha cuidado de mí, incluso a la distancia. A mi hermano, Samuel, que siempre podrá contar conmigo para alcanzar sus sueños y que, aunque ya sea más alto que yo, siempre será mi pulga.

A mis compañeros de carrera, en primer lugar, quienes han estado conmigo desde la sede UIS Barbosa: Brayan, Aleja, Lucía, Tatiana, Gabriela, Ana y, en especial, Mariana y Laura, quienes me han apoyado en cada ocurrencia que tuve en la carrera y no me dejaron perder mi norte. A Valentina, Juanfer, Julián, Sofía, Leonardo, Stefa, Yamile y Juan Diego, quienes me acogieron desde mi llegada a Bucaramanga y me han acompañado incondicionalmente.

A la profe Yurany, por generarme amor por la carrera. Al profe Gustavo, por ampliar mi interés en nuevos horizontes de estudio. A la profe Liliana, quien desde el primer momento me ha ayudado a crecer como persona e ingeniera, por rodearme de conocimiento y pasión por los proyectos y por ayudarme a abrir puertas cada vez más grandes. Al profe Humberto, por su sabiduría tanto en la carrera como en lo personal y por creer en mí para este proyecto.

A Cirley, María Paula y María José, por ser grandes mujeres. A Alexander, no me alcanzan las palabras para agradecerte por tu apoyo y sabiduría; gracias por tu guía y consejos, tanto para el laboratorio como para la vida, y por tantas risas y shots de aguardiente amarillo. A Henry, quien, aunque al inicio ambos dudábamos del rumbo de este proyecto, se convirtió en una mano amiga y en un ingeniero admirable.

A los grupos culturales de los que hice parte en la universidad, a la profe Rocío, al maestro Néstor y a mis compañeros del grupo de vientos y de música y danzas UIS. Siempre estarán presentes en cada paso que dé y en cada compás que toque. A mis compas del movimiento estudiantil, por creer en mis proyectos y por luchar día a día por una educación pública y de calidad. A mis amigas de los movimientos feministas, por no dejarme sola cuando más lo necesité y por hacer del mundo un lugar más seguro para todas.

A Twenty One Pilots, porque sus letras han sido mi salvación en los momentos más oscuros de mi vida, me han impulsado a salir adelante y a no rendirme. A Andrés, quien con amor ha curado heridas que él no generó y que, día a día, me impulsa a ser la mejor versión de mí y a cumplir mis metas.

Finalmente, a mí, a la Yaya chiquita que se preguntaba si lo iba a lograr. Hoy puedo decirte que confíes en tu potencial, porque vas a lograr todo lo que te propongas y, sin importar qué reto se presente, podrás con todo. Sigue siendo la mujer dedicada y apasionada que inspira a mucha gente a tu alrededor.

Daiana Rocio Medina Medina

A Dios por haberme dado la luz en los momentos de oscuridad y haberme permitido superar los obstáculos. A mi papá Henry, que siempre me ha enseñado que el esfuerzo, la dedicación y el amor a lo que se hace son la base del éxito. A mi mamá Alexandra, por su amor, dedicación y por inculcarme la fé, realmente mueve montañas. A mi hermana sarita, que ha sido mi confidente en mis 21 años de vida y por ser mi mayor motivación para ser una mejor persona. A mi familia por sus oraciones.

A mis compañeros de carrera, en especial a mis amigos Juanma, Jd, Juanfer, Juls y Mateo, que me acompañaron en la travesía de convertirme en ingeniero químico, gracias infinitas. A Diana por haberme acompañado, por sus buenos consejos y por creer en mí cuando el panorama no era claro. A Angélica, por su amor, motivación y apoyo incondicional desde el día 0.

Al profe Humberto, por la confianza depositada en mí; por ser mi profesor, mentor, amigo y sobretodo, por su sabiduría inconmensurable. Al profe Crisos por sacarme de apuros y estar muy pendiente de mí durante toda la carrera. A Pau por convertirse en mi amiga en el laboratorio, por sus palabras de ánimos y apoyo cuando las cosas no salían bien. Al gran Alexander Muñoz, por ese corazón tan grande, lleno de vitalidad y buenos consejos; por la compañía en las visitas y por nunca haberme dado un no cuando le pedí su ayuda, realmente lo aprecio y estaré eternamente agradecido, amigo. A Daiana por haber sido mi compañera de trabajo de grado, su compañía y por los buenos resultados de este proyecto.

Por último, me dedico este triunfo a mí, pues sólo yo sé los sacrificios que realicé, cada uno de ellos valió totalmente la pena. ¡¡¡¡¡Gracias por nunca rendirme y por mis ganas de salir adelante, lo logramos!!!!

Henry Ariza Parra

Agradecimientos

A la finca Villa Porkinos, por abrirnos sus puertas y brindarnos el espacio necesario para desarrollar nuestra investigación, permitiéndonos llevar a cabo nuestro trabajo en un entorno real y aplicado.

A la Universidad Industrial de Santander, por darnos la oportunidad de formarnos como profesionales y proporcionarnos las herramientas necesarias para nuestra educación y crecimiento académico.

A la Escuela de Ingeniería Química, por su compromiso con nuestra formación y por el apoyo de sus docentes, quienes han sido guías fundamentales en nuestro proceso de aprendizaje.

Al profesor Humberto, por su orientación, confianza y motivación constante, así como por su disposición para guiarnos en el desarrollo de este proyecto.

A Alex, por su acompañamiento incondicional, su compromiso con nuestro crecimiento académico, su paciencia y generosidad al compartir con nosotros su tiempo, conocimientos y valiosas sugerencias.

A don Guillermo, Eduardo y Wilson, por su apoyo en el laboratorio, su disposición para facilitarnos los implementos necesarios y por compartir con nosotros su experiencia y conocimientos.

Al profesor Nelson y a José, por apoyarnos en los análisis de laboratorio que necesitábamos y por enseñarnos con paciencia una disciplina nueva para nosotros.

A Diego Salamanca, por brindarnos su experticia y conocimiento en labores de campo y por ser parte de la logística de este trabajo en la finca. A don Franklin por su tiempo. A don Jorge por su disponibilidad, tiempo y por colocarse el overol junto con nosotros en el proyecto.

A Juanfer, Angélica, Andrés, Brandon, Juan Manuel, Juan David, Sergio y Juan Sebastián, nuestros compañeros, por su disposición para ayudarnos siempre que lo necesitamos y por hacer de este proceso una experiencia más enriquecedora y amena.

A nuestras familias y amigos, por su apoyo incondicional, por su paciencia y por ser nuestra fuente de inspiración y fortaleza en cada etapa de este camino.

Introducción**Tabla de contenido**

Introducción.....	13
1. Objetivos.....	17
1.1. Objetivo General.....	17
1.2. Objetivos Específicos.....	17
2. Estado del Arte y Marco Teórico.....	18
2.1 Digestión Anaeróbica.....	18
2.2 Digeridos Anaeróbicos.....	20
2.3 Digeridos.....	21
2.3.1 Tipología De Digerido.....	21
2.3.2 Normativas para uso del digerido.....	23
2.4 Aplicación de digerido en pastos.....	25
2.4.1 Pasto Taiwán.....	25
3 Metodología.....	27
3.1 Diagnóstico Operativo y Funcional del Sistema de DA.....	28
3.2 Tipología del Digerido.....	30
3.2.1 Caracterización Físicoquímica.....	30
3.2.2 Caracterización Bioquímica.....	31
3.2.3 Caracterización Microbiológica.....	32
3.2.4 Fitotoxicidad Residual del Digerido.....	32
3.3 Evaluación del Uso del Digerido en Cultivo de Pasto Taiwán.....	32
3.3.1 Condiciones del Cultivo.....	33
3.3.2 Aplicación del Digerido.....	34
3.3.3 Monitoreo de Cultivo.....	34
3.4 Análisis Económico del Proceso.....	35
4 Resultados.....	36
4.1 Monitoreo de la Batería de Biodigestores.....	36
4.2 Caracterización Físicoquímica y Bioquímica del digerido.....	39
4.2.1 Materia Orgánica.....	39
4.2.2 Nutrientes.....	40
4.2.3 Metales Pesados presentes en el digerido.....	41

4.2.4	Caracterización Microbiológica del digerido	42
4.2.5	Matriz de Tipología del Digerido	43
4.3	Desarrollo Vegetal (pasto Taiwán) mediante fertirriego con digerido	45
4.3.1	Morfología y Crecimiento Vegetal.....	45
4.3.2	Análisis bromatológico	50
4.4	Análisis Económico.....	53
5	Conclusiones	57
6	Recomendaciones	58
	Referencias Bibliográficas	59
	Aprendice	71

Lista de Tablas

Tabla 1. Normatividades para el uso potencial de digerido en la agricultura	24
Tabla 2. Parámetros de diseño de la batería de biodigestores de Villa Porkinos	29
Tabla 3. Métodos analíticos para la determinación de metales pesados en el digerido	30
Tabla 4. Métodos analíticos para la determinación de nutrientes en el digerido	31
Tabla 5. Métodos analíticos para la caracterización microbiológica del digerido	32
Tabla 6. Condiciones de dilución del digerido evaluados en el cultivo de pasto Taiwán.....	34
Tabla 7. Métodos analíticos para análisis bromatológico del pasto Taiwán	35
Tabla 8. Contenido de materia orgánica y parámetros bioquímicos del digerido.	39
Tabla 9. Contenido de nutrientes en el digerido.....	40
Tabla 10. Contenido de metales pesados en el digerido	41
Tabla 11. Contenido microbiológico en el digerido	42
Tabla 12. Parámetros y límites evaluados al digerido	43
Tabla 13. Distribución aleatoria de parcelas	45
Tabla 14. Análisis biogás vs otras fuentes de combustión.....	53
Tabla 15. Análisis CAPEX-OPEX.....	54
Tabla 16. Indicadores económicos	55

Lista de Figuras

Figura 1. Pasto Taiwán.....	26
Figura 2. Diagrama metodológico	27
Figura 3. Sistema de DA implementado en Villa Porkinos	28
Figura 4. Diagrama de la distribución de plantas para evaluar el cultivo de pasto Taiwán irrigado con digerido diluido.....	33
Figura 5. Monitoreo de SV del sistema de DA en Villa Porkinos	36
Figura 6. Monitoreo de DQO del sistema de DA en Villa Porkinos	37
Figura 7. Producción de biogás del sistema de DA en Villa Porkinos.	38
Figura 9. Vista general del terreno de experimentación para cultivo pasto Taiwán.....	46
Figura 10. Crecimiento del pasto Taiwán en las parcelas experimentales a los 30 días	46
Figura 11. Incremento de biomasa seca en función del tiempo y los tratamientos	47
Figura 12. Incremento del área foliar en función del tiempo y los tratamientos	48
Figura 13. Comportamiento de diámetro de tallo	49
Figura 14. Comportamiento de longitud de tallo.....	49
Figura 15. Contenido porcentual de carbohidratos por planta en función de los tratamientos aplicados. .	50
Figura 16. Contenido porcentual de proteínas por planta en función de los tratamientos aplicados.	51
Figura 17. Contenido porcentual de fibra por planta en función de los tratamientos aplicados	52

Tabla de Apendices

Apendice A. Tabla comparativa de efecto de aplicación del digerido en el suelo..... 71

Glosario

DA: Digestión anaeróbica

DQO: Demanda química de oxígeno

SV: Sólidos volátiles

ST: Sólidos totales

AGV: Ácidos grasos volátiles

PBMr: Potencial de biometanización residual

CE: Conductividad eléctrica

CH₄: Metano

CO₂: Dióxido de carbono

H₂S: Sulfuro de hidrógeno

VCO: Velocidad de carga orgánica

TRH: Tiempo de retención hidráulica

GEI: Gases de efecto invernadero

AT: Alcalinidad total

VPN: Valor presente neto

TIR: Tasa interna de retorno

PRI: Periodo de recuperación de la inversión

Resumen

Título: Valorización del Digerido Producido en la Digestión Anaeróbica de los Residuos Agroindustriales de una Granja Porcícola para el Mejoramiento del Cultivo de Pasto de Corte Taiwán*

Autor: Daiana Rocio Medina Medina y Henry Ariza Parra**

Palabras clave: Digerido, Estiércol Porcino, Pasto de Corte, Digestión Anaeróbica

Descripción: En el presente trabajo de investigación se realizó un diagnóstico del sistema de digestión anaeróbica (DA) en la finca Villa Porkinos y se evaluó la calidad del digerido producido. La batería de DA consta de 4 biodigestores tubulares de 40 m³, operados bajo condiciones mesofílicas. Se monitorearon parámetros como sólidos totales (ST), demanda química de oxígeno (DQO) y producción de biogás. Los resultados mostraron porcentajes de remoción de carga orgánica entre el 55% y el 75%, así como una producción de biogás de 17 Nm³/día, con un 71% de metano. El digerido se analizó en función de sus parámetros fisicoquímicos, bioquímicos y microbiológicos. Se observó que el digerido presentó bajos niveles de DQO (3,22 g/L), sin la presencia de Salmonella Spp. ni huevos de helmintos, pero con E. coli y coliformes fecales, lo que requiere tratamiento adicional para su eliminación. Aunque el digerido no cumple con la normativa para ser clasificado como fertilizante líquido mineral debido a su bajo contenido de nutrientes esenciales, puede ser utilizado como suplemento orgánico. En cultivos de pasto Taiwán (*Pennisetum purpureum*), el tratamiento con una mezcla de 60% de digerido y 40% de agua incrementó significativamente la biomasa y el área foliar, mientras que el uso de digerido sin diluir (100%) causó toxicidad por exceso de nutrientes. El uso del digerido en Villa Porkinos representa una inversión rentable, con una tasa interna de retorno (TIR) del 28,30% y un periodo de recuperación de la inversión (PRI) de 4 años. Los resultados demuestran que el digerido estabilizado, cuando se aplica en las diluciones adecuadas, no solo mejora la productividad forrajera, sino que también contribuye a la reducción de costos en fertilización, convirtiéndolo en una alternativa sostenible para la gestión de residuos agroindustriales.

*Trabajo de Grado

**Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química, Director: Humberto Escalante Hernández, PhD en Ingeniería Química. Codirector: Alexander Muñoz Muñoz, MSc en Ingeniería Química. Tutor: Nelson Facundo Rodríguez López, PhD en Fisiología Vegetal

Abstract

Title: Valorization of the Digestate Produced in the Anaerobic Digestion of Agro-Industrial Waste from a Swine Farm for the Improvement of Taiwan Grass Cultivation*

Author(s): Daiana Rocio Medina Medina and Henry Ariza Parra**

Keywords: Digestate, Swine Manure, Forage Grass, Anaerobic Digestion

Description: In the present research work, a diagnosis of the anaerobic digestion (AD) system at the Villa Porkinos farm was carried out, and the quality of the produced digestate was evaluated. The AD system consists of four tubular biodigesters of 40 m³, operated under mesophilic conditions. Parameters such as total solids (TS), chemical oxygen demand (COD), and biogas production were monitored. The results showed organic load removal rates between 55% and 75%, as well as biogas production of 17 Nm³/day, with 71% methane content. The digestate was analyzed based on its physicochemical, biochemical, and microbiological parameters. It was observed that the digestate had low COD levels (3.22 g/L), with no presence of *Salmonella Spp.* or helminth eggs, but with *E. coli* and fecal coliforms, requiring additional treatment for their elimination. Although the digestate does not meet the criteria to be classified as a liquid mineral fertilizer due to its low content of essential nutrients, it can be used as an organic supplement. In Taiwan grass (*Pennisetum purpureum*) crops, treatment with a mixture of 60% digestate and 40% water significantly increased biomass and leaf area, while the use of undiluted digestate (100%) caused toxicity due to nutrient excess. The use of digestate at Villa Porkinos represents a profitable investment, with an internal rate of return (IRR) of 28.30% and an investment recovery period (IRP) of 4 years. The results demonstrate that stabilized digestate, when applied in appropriate dilutions, not only improves forage productivity but also contributes to the reduction of fertilization costs, making it a sustainable alternative for the management of agroindustrial waste.

*Degree Work

**Faculty of Physicochemical Engineering, School of Chemical Engineering. Director: Humberto Escalante Hernández, PhD in Chemical Engineering. Co-Director: Alexander Muñoz Muñoz, MSc in Chemical Engineering. Tutor: Nelson Facundo Rodríguez López, PhD in Plant Physiology

Introducción

La porcicultura en Colombia contribuye con el 6% del producto interno bruto, con una producción anual promedio de 10 a 11 millones de cerdos. En 2023, la producción de carne de cerdo alcanzó las 564.778 toneladas (PorkColombia, 2023).

La producción porcícola intensiva disminuye los costos operativos, aumenta la rentabilidad e incrementa la cantidad de residuos generados como estiércol, orina y aguas de lavado (Dottavio y Di Masso, 2010). La gestión inadecuada de estos residuos representa un desafío ambiental importante, porque pueden provocar la lixiviación de nutrientes hacia fuentes hídricas y emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (Gómez-Brandón et al., 2013). La emisión de amoníaco, sulfuro de hidrógeno, metano y dióxido de carbono genera olores desagradables y trastornos respiratorios, además contribuye a la destrucción de la capa de ozono por óxido nitroso (Novelo et al., 2009). Sin embargo, los residuos porcícolas pueden aportar nutrientes al suelo, modificar el pH, y alterar su microbiota. Asimismo, en cuerpos de agua superficiales, las excretas provocan la presencia de amonio, fosfatos y sulfatos, favoreciendo el crecimiento de algas, el agotamiento del oxígeno disuelto y la eutrofización (Novelo et al., 2009).

La implementación de sistemas de gestión, tratamiento y valorización de residuos es clave para mitigar los impactos ambientales del sector porcícola. Actualmente, existen diferentes tecnologías (nitrificación, compostaje, digestión anaerobia, etc) que surgen como alternativas para la gestión de residuos (Corredor y Pérez, 2018). La digestión anaeróbica (DA) es un proceso biológico, en el cual un consorcio microbiano degrada y estabiliza la materia orgánica, reduciendo los riesgos de contaminación, los malos olores y los microorganismos patógenos (Walsh, 2012).

La DA genera dos productos: un biogás (compuesto por CH₄, CO₂ y H₂S) y un efluente denominado digerido (Piadeh et al., 2024). El digerido representa aproximadamente el 90% del

volumen alimentado al biodigestor (Lamolinara et al., 2022) y puede contener entre un 20% a 95% de la materia orgánica alimentada, dependiendo de los residuos a gestionar.

A escala rural, el uso del biogás ha sido principalmente como energía calórica para cocción de alimentos. En cuanto al digerido por su contenido en nutrientes, suele ser usado como fertilizante y acondicionador de suelos (Kovačić et al., 2022). A pesar de sus beneficios, en Colombia persisten barreras para la difusión de la DA, como la variabilidad en la composición y su tipología como características fisicoquímicas, microbiológicas y agronómicas de los digeridos.

En Colombia no existe una regulación para el uso de digeridos en actividades agrícolas. La falta de una normativa, sumado a la variabilidad en la composición de los digeridos representa una de las barreras de la difusión de la DA en el país. Existen regulaciones/normas como la NTC 5167 (Icontec, 2004), los estándares de calidad para el uso de aguas residuales (OMS, 2015) y los requisitos para el uso de agua de riego del Ministerio de Ambiente. Estas regulaciones buscan también proteger la salud humana y animal, así como la calidad de los cultivos. A nivel nacional, el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) mediante la Resolución 150 de 2003 regula la producción y comercialización de fertilizantes para el uso agrícola. La resolución adopta el reglamento técnico de fertilizantes y acondicionadores de suelos en Colombia. Adicionalmente, la norma técnica colombiana NTC 516765 (Icontec, 2004) establece los requisitos que deben cumplir productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes cumplir y los ensayos a los cuales deben ser para ser categorizados como acondicionadores de suelo. Por su parte, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, mediante las resoluciones 1256 de 2021 y 0631 de 2015, establece las disposiciones relacionadas con el uso de agua residuales en la agricultura y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales, respectivamente.

En el municipio de Lebrija, Santander, se encuentra la granja Villa Porkinos (Vereda La Puente, 7°03'33.2" N; 73°12'54.9" W, 1055 m.s.n.m), dedicada a la producción porcina para su venta en pie y a la intensificación de ganado vacuno para la producción de leche. Actualmente, la granja cuenta aproximadamente con 2400 cerdos y alrededor de 220 reses raza Gye. Villa Porkinos ha implementado la DA como alternativa para gestionar los residuos de lavado de cocheras de cerdos, para ello ha instalado una batería de 4 biodigestores tubulares de 40 m³. Actualmente, el biogás producido en los biodigestores de Villa Porkinos es usado en la granja como fuente de energía térmica para cocción de alimentos. Adicionalmente, a futuro Villa Porkinos quiere emplear el para el servicio de calefacción en las cocheras de lechones. Por otra parte, Villa Porkinos es consciente con la política al medio ambiente y está interesada en utilizar adecuadamente el digerido en los cultivos de pasto (para alimentación bovina) y además cumplir con los requerimientos gubernamentales.

La producción agrícola en la granja se complementa con el cultivo de pasto de corte Taiwán (*Pennisetum Purpureum*), una variedad de alta productividad y calidad nutricional, utilizada como alimento para las reses. El pasto Taiwán es ampliamente cultivado en regiones tropicales y subtropicales debido a su vigor, persistencia y valor nutritivo (Singh, Singh, y Obeng, 2013; Bodgan, 1997).

Para garantizar el máximo aprovechamiento de este forraje, es esencial optimizar las condiciones de cultivo y mejorar sus propiedades nutricionales, lo que representa una oportunidad para integrar el uso del digerido como fuente de nutrientes (Martínez y Blandon, 2018). En este contexto, en Villa Porkinos se desea conocer: ¿Cómo está operando la batería de biodigestores, que permite la gestión de las aguas de lavado de los corrales? ¿Cuál es la tipología del digerido, obtenido de la DA de las aguas de corrales? ¿Es viable utilizar el digerido para mejorar los cultivos

de pasto Taiwán, utilizado como alimento de bovinos? Las anteriores preguntas se tomaron como base para establecer los objetivos del presente trabajo de grado, modalidad investigación.

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Evaluar el potencial fertilizante del digerido obtenido de la DA de aguas de lavado de agroindustria porcícola intensiva.

1.2. Objetivos Específicos

- Determinar la tipología del digerido producido en la granja porcícola Villa Porkinos.
- Evaluar el digerido obtenido del proceso de DA de estiércol porcino sobre el desarrollo vegetal del cultivo de pasto Taiwán (*Pennisetum Purpureum*).
- Determinar el impacto económico que representa la aplicación de digerido sobre el cultivo de pasto Taiwán (*Pennisetum Purpureum*) en la finca Villa Porkinos.

2. Estado del Arte y Marco Teórico

2.1 Digestión Anaeróbica

La DA es un proceso biológico mediante el cual microorganismos descomponen residuos orgánicos en ausencia de oxígeno, generando biogás y un lodo residual denominado digerido. La DA se desarrolla en cuatro etapas principales: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Morales Paredes et al., 2018; Bermúdez et al., 1988). En la hidrólisis, las moléculas complejas de la materia (proteínas, carbohidratos y lípidos) se degradan a compuestos más simples (aminoácidos, azúcares y ácidos grasos); en la acidogénesis, las moléculas degradadas se fermentan y producen AGV de cadena corta como ácido butírico, propiónico y acético (Arango Bedoya y Sanches Sousa, 2009); posteriormente, en la acetogénesis, los AGV se convierten en acetato, hidrógeno y dióxido de carbono. Finalmente, en la metanogénesis, se produce metano y dióxido de carbono a partir del acetato producido.

La DA se lleva a cabo en unidades de operación denominadas biodigestores. Dentro de los biodigestores empleados en la DA están los de tipo UASB, tambor rotatorio, tipo laguna, domo fijo, tubulares, batch y CSTR. En Colombia los biodigestores más usados en zonas rurales son los tubulares de bajo costo, los cuales se han empleado para la gestión estiércoles bovino, porcino, equino (Molano, Ramírez, y Hernández, 2019) y gallinaza de jaula (Marin-Batista, Castro, y Escalante, 2015). Actualmente se estima que hay aproximadamente 996 biodigestores tubulares de bajo costo instalados (Tavera-Ruiz et al., 2023), operando con volúmenes que oscilan entre 5 m³ y 30 m³ (Parra Huertas, 2015). A gran escala, la DA se ha usado en plantas de beneficio bovino para la gestión de aguas de lavado usando reactores tubulares (Castro-Molano et al., 2016), en plantas de aguas residuales usando reactores de tipo UASB y en industria alimentaria para el tratamiento

de lactosuero y refinadores de aceites implementando reactores tubulares y UASB (Gunay y Karadag, 2015).

Los principales parámetros operacionales para el diseño y funcionamiento de un biodigestor son, la temperatura, el tiempo de retención hidráulico (TRH), la velocidad de carga orgánica (VCO) y el sustrato. La temperatura está directamente relacionada con la actividad microbiana del proceso, puesto que a una mayor temperatura todas las etapas de la DA se favorecen, mejorando la eficiencia de degradación y acelerando la conversión de materia orgánica en biogás (Acosta, 2005). Dependiendo del rango de temperatura el proceso puede clasificarse en condiciones psicrófilas ($T < 18^{\circ}\text{C}$), mesófilas ($18^{\circ}\text{C} < T < 35^{\circ}\text{C}$) o termófilas ($T > 35^{\circ}\text{C}$). El tiempo de retención hidráulico está relacionado con el volumen de operación, la composición del sustrato y la temperatura del proceso. Por otro lado, la VCO está relacionada con la cantidad de materia orgánica que ingresa al biodigestor diariamente. Un incremento en la VCO favorece la producción de metano, sin embargo, puede afectar la estabilidad e inhibir el proceso por el aumento en la concentración de AGV y la disminución de pH.

En condiciones psicrófilas, los biodigestores operan con TRH elevado (70-90 días), junto con una VCO baja ($0,5 \text{ SV/m}^3 \text{ biodigestor} \cdot \text{d}$) (Cucina et al., 2021a). En condiciones mesófilas, el TRH varía en un rango más amplio (28 días-90 días), mientras que la VCO es baja ($0,34$ y $1,01 \text{ kg SV/m}^3 \text{ biodigestor} \cdot \text{d}$). Por otro lado, en condiciones termófilas el TRH es considerablemente menor (20 días-30 días) y la VCO alcanza valores elevados ($10,1$ y $20,3 \text{ SV/m}^3 \text{ biodigestor} \cdot \text{d}$), debido al desempeño más eficiente del consorcio microbiano en estas condiciones (55°C) (Kim, Ahn, y Speece, 2002).

La estabilidad operativa de un biodigestor se evalúa mediante variables como la calidad del biogás producido, las concentraciones de amoníaco libre y AGV en el efluente, y la reducción de

la carga orgánica durante el proceso (Jaimes-Estévez, 2024). Un aumento en la concentración de AGV puede ser causado por una alta carga orgánica en el alimento, sustratos con pH bajos o desbalances en la ruta metabólica como la inhibición de alguna de las etapas de la DA, lo que reduce la alcalinidad y puede desestabilizar el sistema (Archila Menco, 2021). Por otro lado, una mayor concentración de amoníaco libre afecta directamente a las arqueas metanogénicas, causando su inhibición, la acumulación de AGV como productos intermedios y, eventualmente, la acidificación del biodigestor (Archila Menco, 2021).

En la DA, no hay un rango establecido que pueda relacionar la inhibición por AGV y amoníaco libre, ya que estos valores dependen de factores como el pH, el tipo de sustrato y la temperatura del sistema. Sin embargo, concentraciones de AGV inferiores a 1,5 kg/m³ son adecuadas para mantener un proceso estable en la gestión de estiércol porcino bajo condiciones mesofílicas y un pH alcalino (Angelidaki, Boe, y Ellegaard, 2005). Adicionalmente, concentraciones superiores de 1450 mg/L de amoníaco libre inducen la inhibición en la DA de estiércol porcino en condiciones termofílicas bajo pH ligeramente alcalino (Yenigün y Demirel, 2013).

2.2 Digeridos Anaeróbicos

El digerido se caracteriza por su contenido de nutrientes esenciales (Inia, 2008) y se utiliza ampliamente como fertilizante y acondicionador de suelos (Pérez y Torres Lozada, 2011). El uso del digerido en agricultura reduce la dependencia de fertilizantes químicos y mejora tanto la fertilidad como la estructura del suelo (Bugiolacchio, 2020). Sin embargo, los digeridos pueden presentar problemas por la producción de metano residual a partir de la materia no degradada en el proceso, presencia de metales pesados y patógenos, elevadas concentraciones de sales solubles que pueden afectar la estabilidad hidráulica del suelo y concentraciones de nitrógeno amoniacal libre y AGV que pueden afectar el medio ambiente, los cultivos y el suelo (Garfí et al., 2011, 2019).

2.3 Digeridos

2.3.1 *Tipología De Digerido*

La tipología de los digeridos está relacionada con sus características fisicoquímicas, bioquímicas y microbiológicas, que dependen del sustrato alimentado y las condiciones operativas del biodigestor, como el TRH, la VCO y la temperatura. Estas características condicionan y determinan los tratamientos requeridos antes de su uso. En la agricultura, los digeridos se emplean como agua de riego, fertilizantes o acondicionadores de suelo, siendo su aplicación más común el complemento a fertilizantes comerciales mediante riego directo.

Los digeridos suelen tener un pH alcalino, debido a la formación de $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ y a la remoción de CO_2 del proceso de DA (Muñoz Muñoz, 2024). La conductividad eléctrica de un digerido está relacionada con el contenido de sales solubles presentes en el sustrato, y en altos niveles, puede causar erosión o disminución en la capacidad de drenaje del suelo (Martínez-Villavicencio et al., 2011).

Respecto al contenido de materia orgánica en los digeridos, este se puede evaluar de manera indirecta mediante los SV. La remoción de SV durante el proceso de DA refleja la eficiencia en la degradación de la materia orgánica presente. Además, su reducción está estrechamente relacionada con una disminución en la DQO, lo que indica una menor cantidad de compuestos orgánicos susceptibles de oxidarse. En términos generales, un digerido con baja DQO se asocia con un bajo PBMr (Albuquerque et al., 2012a), lo que evidencia que el digerido ha alcanzado un estado de estabilidad biológica y minimiza los riesgos ambientales, como las emisiones de olores y gases de efecto invernadero.

Los digeridos suelen presentar una reducción en la carga microbiológica en comparación con el sustrato inicial, debido a que las etapas metabólicas del proceso inhiben microorganismos patógenos. Además, en biodigestores sin sistemas de agitación, como los tubulares, se produce sedimentación de sólidos, lo que contribuye a la disminución de la carga microbiana. El contenido de patógenos en los digeridos depende en gran medida de la temperatura del proceso, que influye tanto en la estabilidad biológica del digerido como en la eficiencia de la eliminación de patógenos. A pesar de la reducción en la carga microbiológica, los niveles de patógenos en los digeridos suelen exceder los límites establecidos por las normativas sanitarias, lo que representa un riesgo para la salud si se aplican directamente en suelos o cultivos (Cucina et al., 2021b). Por lo tanto, es necesario sistemas de postratamiento para asegurar su inocuidad antes de su aplicación (Castro et al., 2017).

Los digeridos anaerobios contienen nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y micronutrientes, los cuales provienen del sustrato alimentado al biodigestor. El nitrógeno, en forma de amonio (NH_4^+), es fundamental para el crecimiento vegetal, pero su exceso puede ser tóxico (Archila Menco, 2021). El fósforo, presente como fosfato, es clave para el desarrollo de las raíces y la formación de energía en las plantas, aunque su biodisponibilidad depende del pH del digerido y otros compuestos presentes. El potasio, en forma soluble, regula procesos osmóticos y mejora la resistencia de las plantas. Además, los digeridos pueden aportar micronutrientes como hierro, manganeso, zinc y cobre, esenciales para diversas funciones metabólicas. Aunque los digeridos representan una fuente valiosa de nutrientes, su biodisponibilidad está influenciada por las condiciones del biodigestor y el tipo de sustrato utilizado, por lo que es crucial evaluar su potencial fertilizante antes de su aplicación en suelos agrícolas (Albuquerque et al., 2012a).

2.3.2 Normativas para uso del digerido

La implementación de una normativa para el uso de digeridos anaerobios en suelos agrícolas es fundamental para garantizar su seguridad y sostenibilidad. Las normas establecen límites máximos permisibles para metales pesados y patógenos, además de especificar el contenido mínimo de materia orgánica requerido para su aplicación como fertilizante o acondicionador de suelos. También clasifica los fertilizantes según su origen, composición fisicoquímica y microbiológica, definiendo sus posibles usos.

En Colombia, no existe una normativa específica que regule el uso de digeridos anaerobios en la agricultura; sin embargo, dos normativas relacionadas establecen lineamientos relacionados con el uso de fertilizantes y/o aguas de riego en la agricultura: la Norma Técnica Colombiana (NTC) 5167 y la Resolución 1207 de 2014 del Ministerio de medio ambiente y desarrollo sostenible. La NTC 5167, establece los requisitos que deben cumplir los fertilizantes líquidos orgánicos, incluyendo límites máximos de metales pesados, un contenido mínimo de nutrientes esenciales (como nitrógeno, fósforo y potasio) y restricciones microbiológicas de patógenos como *Salmonella spp.*, coliformes y huevos de helmintos (Icontec, 2004). Por su parte, la Resolución 1207 regula el uso de aguas residuales en la agricultura y establece parámetros sobre la calidad de las aguas residuales, definidos según el tipo de cultivo y la finalidad del uso. Entre los parámetros establecidos se incluyen límites para la concentración de contaminantes, como metales pesados y compuestos orgánicos, así como indicadores microbiológicos, como *Escherichia coli* y huevos de helminto.

A nivel internacional existen normas relacionadas en la agricultura, entre estas como la propuesta por la OMS, el parlamento europeo y la agencia de protección ambientes de EE. UU. En

la Tabla 1 se presenta un resumen de los límites de las diferentes normativas para el uso de digerido en la agricultura.

Tabla 1. Normatividades para el uso potencial de digerido en la agricultura

Parámetro	Unidad	Parlamento europeo*	EPA EE.UU.**	Resolución 1207***	NTC 5167****	OMS*****	
Fisicoquímico	SV/ST	%	-	-	-	-	
	DQO	g/L	-	0,5	<200	-	
	pH	-	-	6,0-9,0	6,0-9,0	-	6,5-8
	CE	μS/cm	-	-	<1500	-	<3000
Microbiológico	Coliformes totales	UFC/mL	<10 ³	1000	<1	>1000	-
	Coliformes fecales		<10 ³	1000	<1	Ausente	-
	<i>E. coli</i>		-	200	Ausencia	Ausente	10E UFC/100mL
	<i>Pseudomonas spp</i>		-	-	Ausencia	Ausente	Ausencia
	Huevos del Helminetos	Huevos/4mL	-	1	<1	<1	<1
	<i>Salmonella spp</i>	Salmonella/25 g	Ausencia	-	Ausencia	Ausente 25/g	-
Nutrientes	Nitrogeno total	g/L	>20	-	0,781	>15	-
	Fósforo total (P ₂ O ₅)		>10	-	0,343	>15	-
	Potasio total (K ₂ O)		>20	-	0,308	>15	-
Metales pesados	Cu	mg/L	<300	-	<1	-	0,2
	Zn		<800	-	<3	-	2
	Hg		<1	-	<0,02	<17	-
	As		<40	-	<0,1	<41	0,1

*Norma sobre la comercialización de productos fertilizantes de la UE

**Norma de calidad para el agua de riego utilizada en consumo animal

***Requisitos para uso de aguas residuales, resolución 1207 Ministerio de medio ambiente

****Requisitos para fertilizante líquido (NTC 5167, 2004)

*****Requisitos para uso de aguas residuales en agricultura, organización mundial de la salud (OMS, 2015)

2.4 Aplicación de digerido en pastos

El uso del digerido como acondicionador de suelos es particularmente eficaz en terrenos con un pH ligeramente ácido a neutro (5,5 – 7,4), rango óptimo para cultivos de pastos de corte como la Maralfalfa (*Pennisetum sp.*) y el Taiwán (*Pennisetum purpureum*) (Catholic Relief Services, 2015). La Maralfalfa, que demanda suelos con fertilidad media a alta, se beneficia significativamente del aporte de nutrientes proporcionado por el digerido, el cual se posiciona como una alternativa eficiente para potenciar su desarrollo vegetal y aumentar el rendimiento de biomasa.

Un estudio realizado por Martínez García y Leiva Estrada (2019) evaluó la aplicación de digerido en pastos de corte tipo Maralfalfa mediante un diseño de bloques completos al azar con cuatro réplicas y seis tratamientos: un testigo, dos combinaciones de N, P₂O₅ y K₂O, y tres dosis diferentes de digerido. Los resultados demostraron que el uso del digerido mejora de manera significativa el crecimiento y la producción del pasto, manteniendo una relación costo-beneficio favorable, lo que lo convierte en una alternativa viable y sostenible para la agricultura intensiva.

2.4.1 Pasto Taiwán

El pasto Taiwán (*Pennisetum purpureum*) es una de las variedades más difundidas en las zonas ganaderas debido a su alta productividad y su valor nutritivo (Figura 1) (Castaño, 2022), con un contenido de proteína cruda de hasta un 10% (Catholic Relief Services, 2015). Esta especie puede crecer en un rango de temperaturas que va desde los 10 °C hasta los 35 °C y se caracteriza por su rápido crecimiento y maduración. Estas cualidades permiten que, bajo condiciones ambientales favorables, el pasto pueda ser cosechado a partir de las 6 semanas posteriores a la siembra (Calzada-Marín et al., 2014).

Figura 1. *Pasto Taiwán*

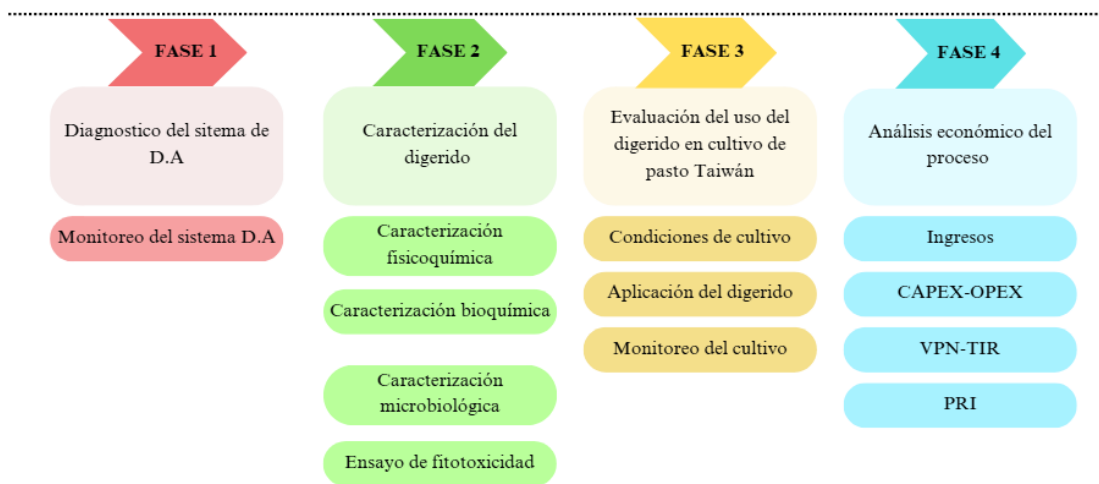


Nota: Tomado de Pasto Taiwán [Fotografía] por Castaño, S. T., 2022, NaturaLista Colombia
(<https://colombia.inaturalist.org/photos/241131984>)

3 Metodología

El presente trabajo de investigación se desarrolló en cuatro etapas metodológicas (Figura 2). En la primera etapa, se llevó a cabo un diagnóstico operativo y funcional del sistema de DA en la granja porcícola Villa Porkinos. La segunda etapa se centró en la determinación de la tipología del digerido producido por la batería de biodigestores de Villa Porkinos. La tipología se determinó a partir de la caracterización del digerido producido en la misma granja, mediante análisis fisicoquímicos, microbiológicos y bioquímicos. En la tercera etapa, y a partir de la tipología del digerido (obtenido en la etapa anterior) se evaluó efecto sobre el crecimiento y desarrollo del cultivo de pasto Taiwán (*Pennisetum Purpureum*). Finalmente, la cuarta etapa consistió en un análisis económico de la aplicación del digerido en el cultivo de pasto de corte.

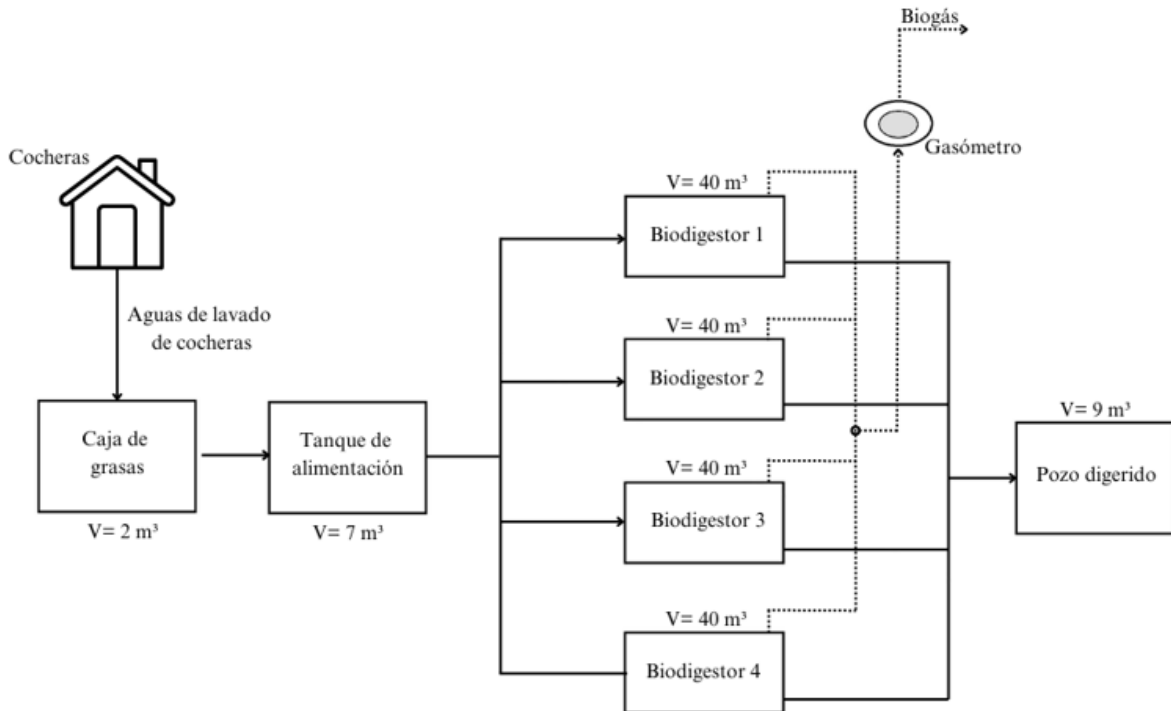
Figura 2. Diagrama metodológico



3.1 Diagnóstico Operativo y Funcional del Sistema de DA

La Figura 3 presenta el sistema DA instalado en Villa Porkinos.

Figura 3. Sistema de DA implementado en Villa Porkinos



El sistema de DA de Villa Porkinos está compuesto por una batería de cuatro biodigestores tubulares conectados en paralelo, que son alimentados con aguas de lavado provenientes de las cocheras de la granja, como se muestra en la Figura 3. En las cocheras, que albergan aproximadamente 1.200 cerdos, se realizan labores de lavado dos veces por semana. Las aguas de lavado de cocheras, que se constituyen en el sustrato (alimento a la batería de bioreactores), primero ingresan a una caja de grasas para retirar sólidos flotantes y grasas. Posteriormente, el sustrato pasa a un tanque de alimentación, del cual se alimentan los cuatro biodigestores, mediante flujo a través de tuberías de PVC de 4 pulgadas de diámetro. El sustrato fluye dentro de cada uno de los biodigestores a un tiempo de retención hidráulico (TRH), indispensable para que pueda llegar a darse el proceso de DA mediante la ruta metabólica, que realiza el consorcio microbiano.

Finalmente, el digerido es descargado en un tanque, que sirve de pozo de reserva para su posterior uso. Las especificaciones de diseño de la batería de biodigestores de Villa Porkinos se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. *Parámetros de diseño de la batería de biodigestores de Villa Porkinos*

Parámetro	Unidades	Valor
Longitud biodigestor	m	16
Diámetro biodigestor	m	2,2
Volumen biodigestor	m ³	40
Volumen de operación	m ³	30
Número de biodigestores	unidad	4
Material construcción	Polietileno baja densidad	-

La estabilidad del proceso de DA de las aguas de corrales de la granja Villa Porkinos se realizó a partir de la determinación del porcentaje de remoción de materia orgánica y la producción y calidad del biogás producido. Para conseguir el anterior objetivo, se realizó un monitoreo del sistema durante un periodo de cuatro semanas, determinando los caudales de sustrato (agua de corrales), de digerido y de biogás producidos. Para medir el caudal de sustrato y de digerido se instalaron válvulas de globo y se utilizó el método volumétrico, a partir del volumen recogido en un determinado tiempo. Las muestras recolectadas de sustrato y de digerido, durante este periodo fueron almacenadas a 4 °C en refrigeradores para su posterior análisis fisicoquímico.

Respecto al biogás, su calidad se determinó a partir de la medición de concentración de metano presente. Para medir la producción diaria de biogás, se instaló un gasómetro doméstico y durante un periodo de 30 días se registró el caudal. Asimismo, se obtuvo una muestra representativa del

sistema completo para analizar su contenido de metano mediante cromatografía de gases, utilizando un cromatógrafo SRI 8610C equipado con un detector de conductividad térmica (TCD).

3.2 Tipología del Digerido

La tipología del digerido se definió en función de sus características fisicoquímicas, bioquímicas y microbiológicas. Estas características dependen principalmente del sustrato alimentado y de las condiciones de operación del biodigestor como el TRH, la VCO y la temperatura del proceso.

3.2.1 Caracterización Fisicoquímica

La caracterización fisicoquímica del digerido se realizó de acuerdo con la cuantificación de ST y SV y la determinación de la DQO, según los métodos estándares 2540 A, 2540 E y 5220 D, respectivamente, propuestos por la APHA, 2017. También se determinó el contenido de metales pesados y macro y micronutrientes. Los métodos que se usaron para la determinación del contenido de metales pesados y nutrientes se presentan en la Tabla 3 y 4, respectivamente.

Tabla 3. *Métodos analíticos para la determinación de metales pesados en el digerido*

Parámetro	Método
Pb	Estándar métodos SM 3111 B
Cd	
Ni	
Cu	
Zn	
Mo	Estándar métodos SM 3111 D
Hg	Estándar métodos SM 3112 B
As	Estándar métodos SM 3111 B, C
Se	

Tabla 4. *Métodos analíticos para la determinación de nutrientes en el digerido*

Parámetro	Método	
K total	Absorción atómica, NTC 5167	
Na soluble en agua		
Ca total		
Mg total		
Mg soluble en agua		
Mn soluble		
Fe total		
Zn total		
S total		Turbidimétrico, NTC 5167
Sulfatos		
N total	Método Kjeldahl, NTC 370	
N amoniacal		
P total	Espectrofotométrico, NTC 234	
Fluoruros	Espectrofotométrico, SM 4500-F	
Nitratos	Espectrofotométrico, SM 4500-NO ₃	
Nitritos	Espectrofotométrico, SM 4500-NO ₂	
Cl residual	Espectrofotométrico, SM 4500 G	
Cloruros	Espectrofotométrico, SM 4500-Cl	
Sulfuros	Titrimétrico, SM 4500 S	
Sólidos insolubles en agua	Gravimétrico, NTC 370	

3.2.2 Caracterización Bioquímica

En términos bioquímicos se cuantificó el potencial de biometanización residual de digerido, usando la técnica de desplazamiento alcalino con una solución de NaOH (0,5 M) según el protocolo reportado por Holliger et al. (2016). Asimismo, se cuantificó la concentración de los AGV y la AT por titulación según indica el protocolo propuesto por Obling Purser et al. (2014).

3.2.3 Caracterización Microbiológica

La caracterización en términos microbiológicos incluyó Coliformes fecales y totales, determinación de huevos de helminto y presencia de *Salmonella Spp.* Los métodos analíticos para la caracterización microbiológica se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Métodos analíticos para la caracterización microbiológica del digerido

Parámetro	Método
Coliformes totales	NTC 4458
Coliformes fecales	
<i>Escherichia coli</i>	
<i>Salmonella spp.</i>	NTC 4574
<i>Pseudomonas spp.</i>	NTC 4574
Huevos del Helmintos	NTC 4574

3.2.4 Fitotoxicidad Residual del Digerido

La fitotoxicidad del digerido se evaluó en ensayos de germinación utilizando semillas de lechuga romana (*Lactuca sativa L.*). El índice de germinación (IG) se determinó siguiendo el protocolo establecido por Tiquia (2000), empleando diluciones del digerido del 1%, 10%, 20%, 50% y 100% v/v.

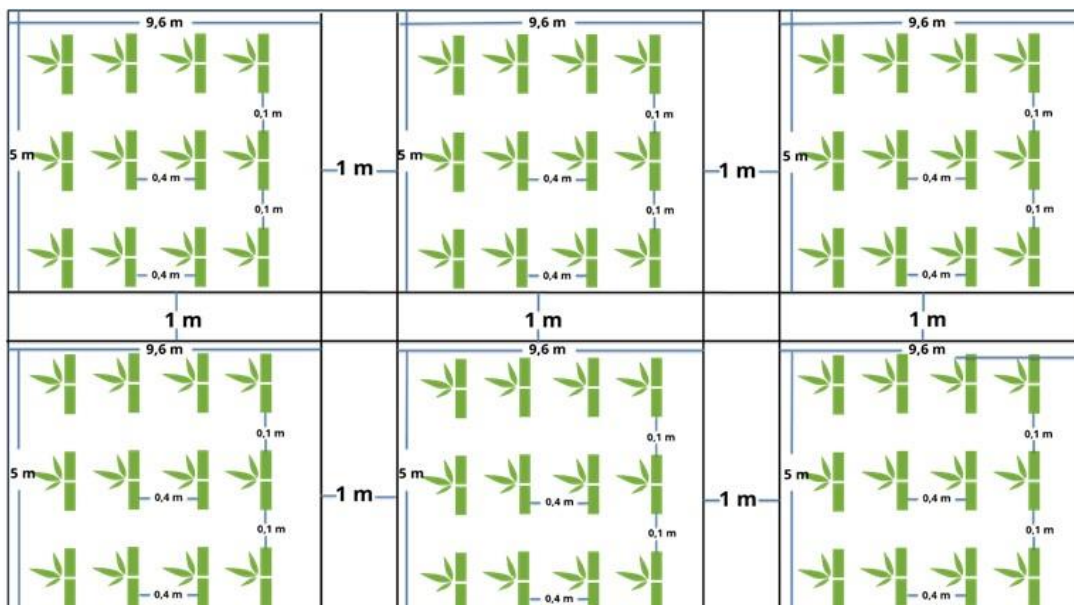
3.3 Evaluación del Uso del Digerido en Cultivo de Pasto Taiwán

El uso del digerido como aporte de nutrientes se evaluó en un cultivo de pasto Taiwán (*Pennisetum Purpureum*). El pasto Taiwán es el usado en Villa Porkinos para alimentación de vacunos dado que posee propiedades resistentes a la sequía, raíces no profundas y rápido crecimiento (Singh et al., 2013).

3.3.1 Condiciones del Cultivo

El cultivo de Taiwán se estableció en condiciones ambientales, utilizando parcelas de tierra que no habían sido fertilizadas previamente con digerido ni con ningún otro tipo de fertilizante. Cada parcela tenía dimensiones de 9,6 m de largo por 5 m de ancho, separadas entre sí por un metro, como se muestra en la Figura 4, llevándose a cabo por triplicado.

Figura 4. Diagrama de la distribución de plantas para evaluar el cultivo de pasto Taiwán irrigado con digerido diluido.



En cada parcela se prepararon cuatro surcos para la siembra, con una distancia de 0,4 m entre ellos. El sistema de siembra empleado en Villa Porkinos consistió en la colocación manual de esquejes en hilera, manteniendo una distancia de 0,05 m entre las puntas de los tallos (Martínez y Blandon, 2018).

3.3.2 Aplicación del Digerido

El digerido se aplicó mediante riego directo a las plantaciones, con una frecuencia de una vez por semana durante un periodo de 45 días. Se evaluaron seis tratamientos del digerido. El diseño experimental utilizado incluyó tres bloques, cada uno compuesto por seis parcelas distribuidas aleatoriamente, correspondientes a los tratamientos a evaluar.

Tabla 6. *Condiciones de dilución del digerido evaluados en el cultivo de pasto Taiwán*

Tratamiento	Dilución fertirriego [%]	
	Digerido	Agua
T1	0	100
T2	15	85
T3	25	75
T4	40	60
T5	60	40
T6	100	0

3.3.3 Monitoreo de Cultivo

Se realizaron dos muestreos durante el desarrollo experimental. El primer muestreo se llevó a cabo 30 días después del brote de cada parcela, y constó de dos fases. En la primera fase se midieron variables morfométricas como la longitud y el diámetro del tallo, el número de hojas, así como el largo y ancho de las hojas. Estas mediciones permitieron determinar el área foliar bajo el método alométrico. Las muestras recolectadas se almacenaron y se secaron en un horno marca MLW durante 72 horas a 72 °C para determinar la biomasa seca.

El segundo muestreo se realizó 15 días después del primero y se dividió en dos fases. La primera, fue la medición de variables morfométricas. En la segunda fase, se tomó una muestra representativa de cada parcela y fue secada durante 48 horas a 72 °C para realizar un análisis bromatológico.

Los resultados de los parámetros evaluados y los métodos analíticos correspondientes se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. *Métodos analíticos para análisis bromatológico del pasto Taiwán*

Parámetro	Método
Carbohidratos	NTC 512
Proteína	ISO 1871:2009
Fibra	ISO 5498:1981

3.4 Análisis Económico del Proceso

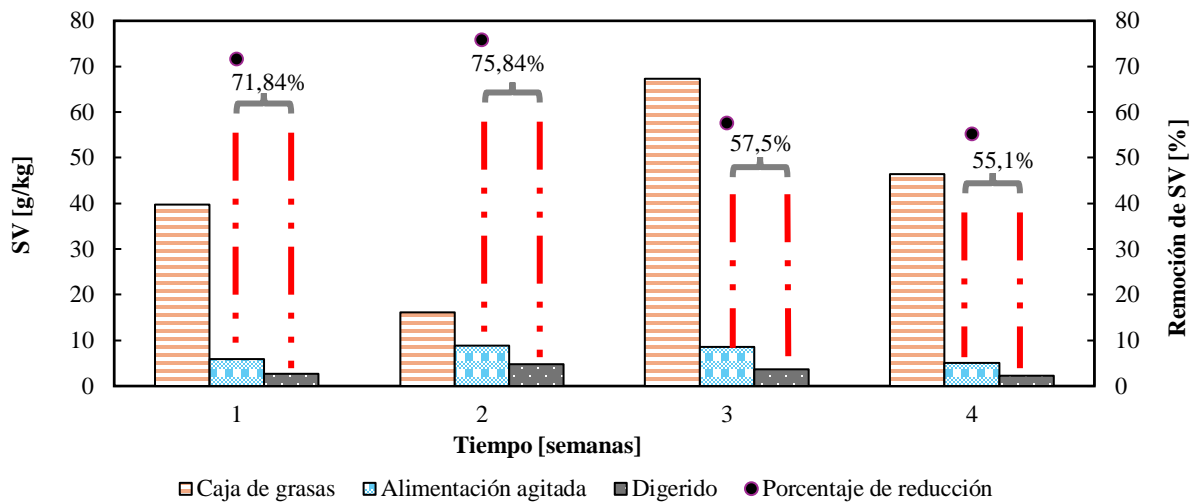
En la cuarta etapa, se llevó a cabo un análisis económico de la aplicación del digerido efluente del proceso de DA en Villa Porkinos, aplicado a un cultivo de pasto Taiwán. Este análisis se realizó utilizando un enfoque CAPEX-OPEX, considerando los costos de instalación y mantenimiento del biodigestor. Cabe destacar que no se incluyó el beneficio económico asociado a la producción de biogás en este análisis. Asimismo, se calcularon indicadores financieros clave, como la TIR y el VPN, para evaluar la viabilidad económica del proyecto.

4 Resultados

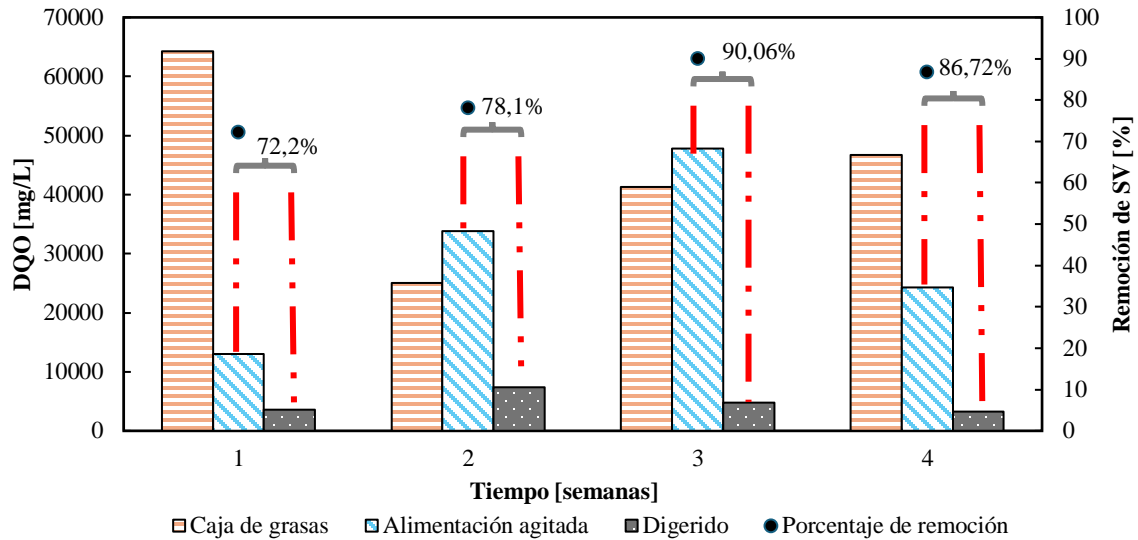
4.1 Monitoreo de la Batería de Biodigestores

En la Figura 5 se presenta la concentración de SV de las corrientes de entrada y salida a la batería de biodigestores de Villa Porkinos; durante un tiempo de 4 semanas.

Figura 5. Monitoreo de SV del sistema de DA en Villa Porkinos



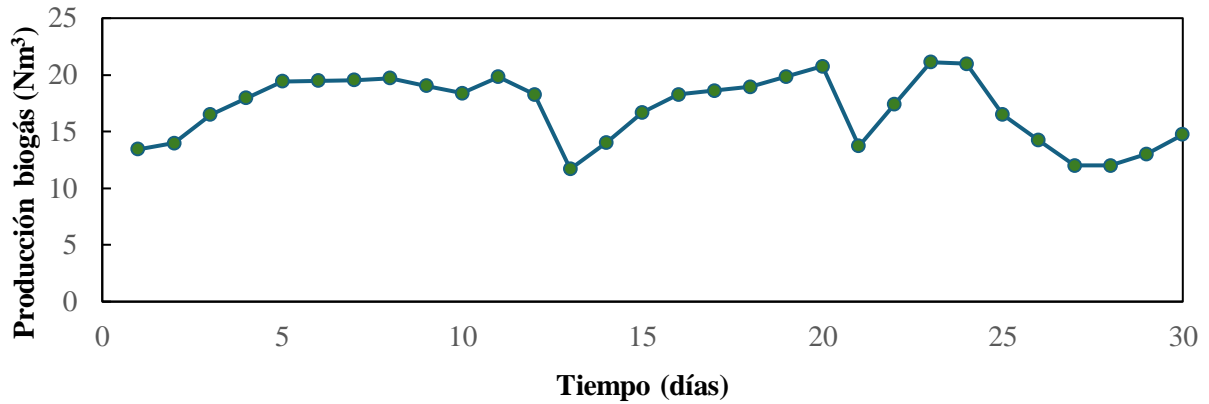
Los SV representan la fracción de materia orgánica que las bacterias descomponen durante los procesos biológicos (Aguilera, 2016). La Figura 5 presenta el monitoreo de SV durante el proceso, en sus diferentes puntos (Caja de grasas, tanque alimentación y pozo de digerido). Se observa para la corriente de alimento y el digerido una disminución progresiva del contenido de materia orgánica, así como una tendencia hacia la estabilidad en las etapas finales del proceso, oscilando la reducción entre el 55%-75%. El porcentaje de reducción de carga orgánica en los biodigestores de Villa Porkinos es superior al reportado por Kinyua, Rowse, y Ergas (2016) (45%-56%) para condiciones mesofílicas. La Figura 6 presenta monitoreo de la DQO con una tendencia similar a la de los SV.

Figura 6. Monitoreo de DQO del sistema de DA en Villa Porkinos

Aunque con mayor variación en los datos, la comparación entre el tanque de alimentación y el digerido mostró una disminución significativa de la DQO, oscilando en un porcentaje de remoción entre 72%-90%. El comportamiento fluctuante de los SV y DQO en la alimentación se debe a una frecuencia de alimentación variable, dado que el proceso es alimentado cuando se realiza el lavado de cocheras (2 veces por semana) con una cantidad de agua no establecida. A pesar que el sistema no tiene una alimentación constante, los porcentajes de remoción obtenidos son superiores a lo reportado por Córdoba et al. (2014) (50%-55%) en condiciones mesofílicas para la gestión de estiércol porcino, reflejando el buen desempeño del sistema de DA implementado en Villa Porkinos.

La Figura 7 muestra la producción semanal de biogás durante el periodo de monitoreo.

Figura 7. Producción de biogás del sistema de DA en Villa Porkinos.



Se observó una tasa de producción con algunas variaciones en función del tiempo, dado el modo de operación de lavado de las cocheras en la planta. Así las cosas, la producción de biogás por día en el sistema de DA de Villa Porkinos fue de aproximadamente 17 Nm^3 ($R^2=0,995$).

Acosta & Uribe (2024) y Jaimes-Estévez et al. (2022) reportaron producciones de biogás de $2,69 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4/\text{día}$ y $9,0 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4/\text{día}$ respectivamente. Sin embargo, la productividad en Villa Porkinos fue de $4,25 \text{ Nm}^3/\text{biodigestor}$, lo cual se atribuye que en la granja el lavado de cocheras no está estandarizado en cuanto al volumen de agua y frecuencia; conduciendo a variabilidad en el caudal de alimentación a los biodigestores. Sin embargo, el análisis cromatográfico del biogás reportó un contenido promedio de metano del 71% una valor superior al reportado por Acosta & Uribe (2024) y Jaimes-Estévez et al. (2022), indicando que tiene una excelente calidad para uso industrial.

4.2 Caracterización Físicoquímica y Bioquímica del digerido

La caracterización físicoquímica y bioquímica del digerido permite entender las transformaciones de los alimentos en el organismo, revelando aspectos clave como su composición y digestibilidad.

4.2.1 Materia Orgánica

En la tabla 8 se presenta contenido de materia orgánica en el digerido.

Tabla 8. *Contenido de materia orgánica y parámetros bioquímicos del digerido.*

Parámetro	Unidad	Valor
DQO	mg O ₂ /L	3220±10
ST	g/kg	4,19±0,11
SV	g/kg	2,27±0,22
PBMr	m ³ CH ₄ /Kg SV*d	0,0315
pH	-	7,86
AT	mg/L	1480±95,39
AGV	mg/L	352±6,93
CE	μS/cm	5.64

El digerido presenta un bajo contenido de sólidos totales (4,19 g/kg), indicando que el proceso de DA, de las aguas de Villa Porkinos, garantiza un alto nivel de remoción de materia orgánica. Así mismo la relación SV/ST de 54,1 corrobora el buen desempeño del proceso, tal como lo recomienda Garfí et al. (2011) y Castro et al. (2017) (40%-60%).

El digerido presentó una baja concentración de DQO (3,22 g/L), inferior a la reportada por Cucina et al. (2021b) (27 g/L) en condiciones psicrofílicas para la gestión de estiércol porcino. Este

valor de DQO se relaciona con la relación SV/ST (54,1%) indicando una disminución de materia orgánica oxidable. Adicionalmente, la DQO se correlaciona con el PBMr (0,0315 m³ CH₄/kg SV) que refleja la estabilidad del proceso. Por lo anterior, el digerido de Villa Porkinos, por su bajo PBMr es favorable para aplicación en suelos, ya que reduce el riesgo de contaminación ambiental por estar estabilizado en términos de materia orgánica y tener pH de 7,76 acorde con lo recomendado por Albuquerque et al. (2012a); en su estudio de DA a partir de estiércol porcino. El digerido presentó alcalinidad de 1.480 mg CaCO₃/L, la cual unido al pH, se atribuye a la degradación de AGV y la liberación de amoníaco durante la hidrólisis de proteínas (Garfi et al., 2019). Los AGV presentaron un valor similar a lo reportado por Cucina et al. (2021b) (250mg/L) para estiércol porcino. Respecto a la conductividad eléctrica, el digerido presentó un valor de 5,64 µS/m. Este valor de CE se encuentra en el rango establecido por la OMS para el uso de aguas residuales en la agroindustria e indica que hay una baja presencia de sales solubles en el digerido.

4.2.2 Nutrientes

La alternativa del uso de digerido como fertilizante orgánico es principalmente la fuente de nitrógeno, fósforo y potasio. En este contexto, una mayor concentración de nutrientes en el digerido incrementa directamente su potencial como complemento fertilizante. En la Tabla 9 se presenta el contenido de nutrientes en el digerido.

Tabla 9. *Contenido de nutrientes en el digerido*

Parámetro	Unidad	Resultado
Nitrógeno total	g/L	0,781
Amonio N		0,677
Fósforo total (P ₂ O ₅)		0,343
Potasio total (K ₂ O)		0,308
Calcio total (CaO)		0,862

Magnesio total (MgO)		0,618
Sodio total		0,15
Hierro		0,027

El contenido de nutrientes en el digerido de Villa Porkinos está relacionado con la dilución del alimento, lo que disminuye su concentración. Este aspecto podría mejorarse mediante un control adecuado de la dilución, estableciendo una mejor relación de alimentación que evite una reducción significativa del potencial fertilizante del digerido.

Cucina *et al.* (2021), en su estudio de DA de estiércol porcino, a dilución 6:1 (agua: estiércol) a condiciones mesofílicas, reportó los valores de 1,70 g/L de nitrógeno total, 2,80 g/L de fósforo total y 0,5 g/L de potasio total. Sin embargo, se observa en la Tabla 9 que los valores encontrados para el digerido de Villa Porkinos son menores a los reportados por Cucina *et al.* Lo anterior, obedece a que en la granja (como se mencionó anteriormente) el agua de lavado de cocheras diariamente no es una variable controlada. Por lo anterior, los digestores de Villa Porkinos no están operando a la dilución requerida y el elevado volumen de agua utilizado disminuye la concentración de nutrientes.

4.2.3 Metales Pesados presentes en el digerido

La Tabla 10 presenta el contenido de metales pesados del digerido de Villa Porkinos.

Tabla 10. *Contenido de metales pesados en el digerido*

Parámetro	Unidad	Valor
Pb	mg/L	<0,10*
Cd		<0,05*
Ni		<0,1*
Cu		3,643
Zn		40,03
Mo		<0,5*
Hg		<0,001*

As		0,007
Se		0,007

*Límite de detección

Metales como el zinc (Zn-40,03 mg/L) y el cobre (Cu-3,643 mg/L) se encuentran en concentraciones elevadas acorde a las empleadas en fármacos y suplementos para animales (Albuquerque et al., 2012b). Por otra parte, la concentración de los metales plomo, cadmio, níquel y mercurio están bajo el límite detectable del método analítico realizado. Respecto al arsénico y selenio a pesar de ser detectados, su concentración es baja, cercana al límite detectable ($\pm 0,002$ mg/L). Lo anterior está en concordancia por lo reportado por Garfi et al. (2011), quienes indican que los digeridos provenientes de estiércol porcino tienen una presencia baja de metales pesados.

4.2.4 Caracterización Microbiológica del digerido

En la Tabla 11 se detallan los resultados microbiológicos del digerido.

Tabla 11. Contenido microbiológico en el digerido

Parámetro	Unidad	Valor
Coliformes totales	UFC/mL	2,40E+03
Coliformes fecales		500
<i>E. coli</i>		Presencia/10mL
<i>Pseudomonas spp</i>		Ausencia
Huevos del Helmintos	Huevos/4mL	Ausencia
<i>Salmonella spp</i>	Salmonella/25 g	Ausencia

El digerido se caracterizó por la ausencia de patógenos como *Pseudomonas spp.*, huevos de helmintos y *Salmonella spp.*, lo cual puede atribuirse al tiempo prolongado de operación del sistema de DA de Villa Porkinos. Sin embargo, se detectó la presencia de coliformes totales y fecales, acorde al sustrato empleado (aguas de lavado porcino). Además, se identificó la presencia

de *E. coli* en el digerido, este patógeno tiene presencia en las heces de animales, producto del proceso de digestión. Por lo anterior se infiere que no es recomendable aplicar a los cultivos este digerido sin un pretratamiento.

4.2.5 Matriz de Tipología del Digerido

En la Tabla 12 se presenta los parámetros evaluados al digerido para identificar su respectiva tipología, los valores límites establecidos por la norma NTC 5167 y los requisitos establecidos por la OMS para el uso de aguas residuales en agricultura.

Tabla 12. Parámetros y límites evaluados al digerido

	Parámetro	Unidad	Valor	NTC 5167*	OMS**
Fisicoquímico	SV/ST	%	54,1	-	-
	DQO	g/L	3,22±0,01	-	-
	pH	-	7,86	-	6,5-8
	CE	µS/cm	5,64	-	<3000
Microbiológico	Coliformes totales	UFC/mL	2,40E+03	>1000	-
	Coliformes fecales		500	Ausente	-
	<i>E. coli</i>		Presencia/10mL	Ausente	10E UFC/100mL
	<i>Pseudomonas spp</i>	Ausencia	Ausente	Ausencia	
	Huevos del Helmintos	Huevos/4mL	Ausencia	<1	<1
	<i>Salmonella spp</i>	Salmonella/25 g	Ausencia	Ausente 25/g	-
Nutrientes	Nitrogeno total	g/L	0,781	>15	-
	Fósforo total (P2O5)		0,343	>15	-
	Potasio total (K2O)		0,308	>15	-
	Calcio total (CaO)		0,862	-	-
	Magnesio total (MgO)		0,618	-	-
	Sodio total		0,15	-	-
Metales pesados	Pb	mg/L	<0,10*	<300	-
	Cd		<0,05*	<39	0,01
	Ni		<0,1*	<420	0,2
	Cu		3,643	-	0,2
	Zn		40,03	-	2
	Mo		<0,5*	-	0,01
	Hg		<0,001*	<17	-
	As		0,007	<41	0,1

*Requisitos para fertilizante líquido (NTC 5167, 2004)

**Requisitos para uso de aguas residuales en agricultura, organización mundial de la salud (OMS, 2015)

Se realiza la comparación de las características del digerido con estas normativas, dado que en Colombia no existen unas normativas específicas vigentes para el uso de digeridos anaeróbicos. El digerido no cumple con los requisitos establecidos por la NTC 5167 y la OMS (2015) para su aplicación en suelos agrícolas. En cuanto a los parámetros fisicoquímicos, el pH se encuentra dentro del rango óptimo indicado por la OMS (6,5-8) y la conductividad eléctrica (CE) está por debajo del límite de 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo que indica bajo contenido de sales disueltas, adecuado para la agricultura. En términos microbiológicos hay ausencia de patógenos como *Salmonella spp.* y huevos de helmintos, lo que asegura la inocuidad del digerido para su uso agrícola. Sin embargo, se observa que los coliformes fecales y totales exceden el límite permitido, por lo que se recomienda un pretratamiento para asegurar la seguridad en su aplicación. En este caso se estudió la dilución como pretratamiento.

Respecto a los metales pesados, los niveles de cobre (Cu) y zinc (Zn) exceden los valores límites establecidos por la OMS, lo cual podría suponer un riesgo en su uso a largo plazo, aunque se ajustan a los requisitos establecidos por la normativa colombiana NTC 5167. En cuanto a los nutrientes, los niveles de nitrógeno, fósforo y potasio no superan los valores mínimos establecidos por la NTC 5167, lo que sugiere que el digerido puede ser utilizado como suplemento o complemento de fertilizantes inorgánicos.

En conclusión, el digerido no representaría un riesgo para su uso en agricultura debido a la estabilización de su materia orgánica y su cumplimiento con los parámetros microbiológicos y fisicoquímicos establecidos por la OMS. Aunque se superan los límites de algunos metales pesados según la OMS y el digerido no cumple con la normativa colombiana, se puede usar como un

complemento orgánico, lo que lo hace adecuado para su uso en la agricultura, siempre que se tenga en cuenta la concentración de coliformes.

4.3 Desarrollo Vegetal (pasto Taiwán) mediante fertirriego con digerido

4.3.1 Morfología y Crecimiento Vegetal

Los pastos y forrajes constituyen el recurso principal para la alimentación de los rumiantes en el trópico. Sin embargo, su calidad y rendimiento están influenciados por la estacionalidad climática, lo que puede limitar su disponibilidad y valor nutritivo en ciertas épocas del año (Ramos-Trejo, Canul-Solis, y Duarte-Vera, 2016). En particular, el pasto Taiwán se caracteriza por su relación directa entre el desarrollo del tallo, el área foliar y la producción de biomasa seca total, factores clave para evaluar su crecimiento y productividad. El área foliar, junto con otras variables morfométricas, juega un papel determinante en la capacidad de la planta para interceptar la radiación fotosintéticamente activa, la cual es la principal fuente de energía para el desarrollo de sus órganos y tejidos (Warnock et al., 2006). Este proceso, a su vez, influye en la acumulación de biomasa seca, un indicador fundamental que determina la disponibilidad y calidad del alimento para los animales (Posada, Rivera, y Ocampo, 2007).

Para comparar el crecimiento de los cultivos al ser fertilizados con las diferentes diluciones de digerido, las 3 unidades de terreno experimental se dividieron en 6 parcelas cada una, para un total de 18; como se observa en la Tabla 13. En la Figura 9, se presenta el terreno de experimentación.

Tabla 13. *Distribución aleatoria de parcelas*

Bloque 1			Bloque 2			Bloque 3		
T4	T3	T2	T1	T4	T3	T1	T5	T2
T1	T5	T6	T5	T6	T2	T6	T3	T4

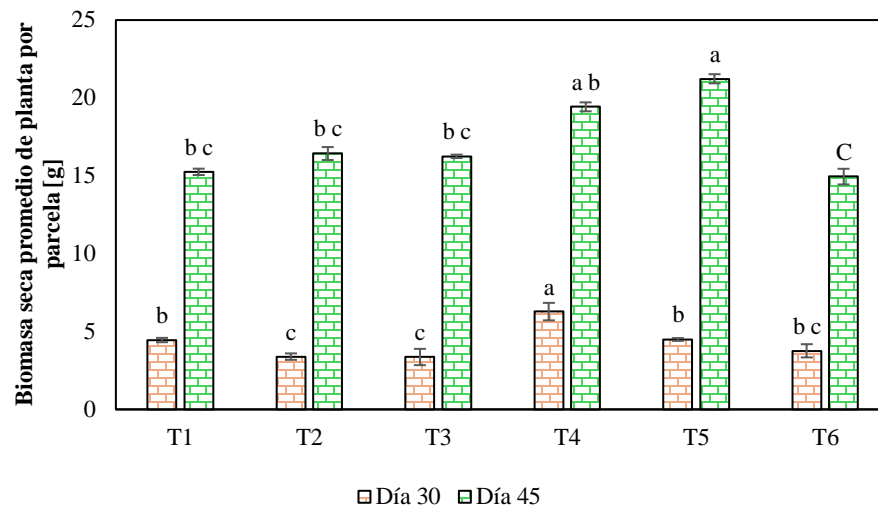
Figura 8. *Vista general del terreno de experimentación para cultivo pasto Taiwán*



Los datos se analizaron con un uso de un ANOVA unidireccional y las medias se examinaron con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software MiniTab V.20 (versión de prueba). En la Figura 10 se observa el crecimiento del pasto Taiwán, en las diferentes parcelas experimentales al día 3; en la Figura 11 se presenta el respectivo incremento en biomasa seca una vez realizado el corte.

Figura 9. *Crecimiento del pasto Taiwán en las parcelas experimentales a los 30 días*



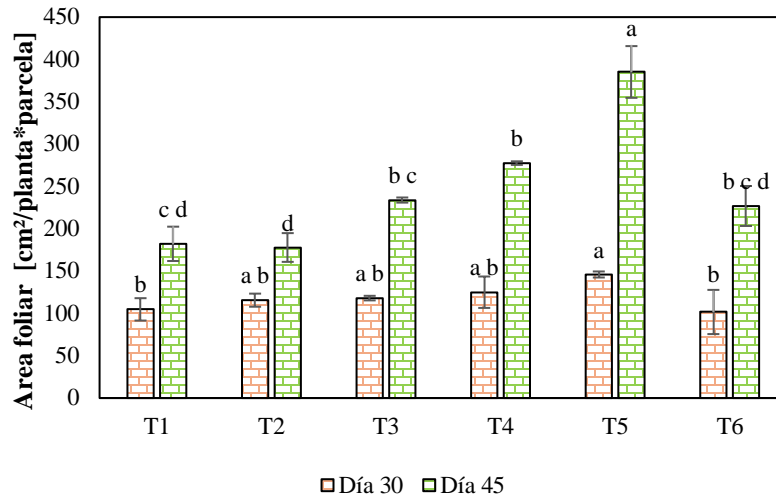
Figura 10. Incremento de biomasa seca en función del tiempo y los tratamientos

En el primer corte se observaron diferencias significativas en la respuesta de los tratamientos ($p > 0.05$), con valores de área foliar que oscilaron entre $104 \text{ cm}^2/\text{planta} \cdot \text{parcela}$ y $145 \text{ cm}^2/\text{planta} \cdot \text{parcela}$ para los tratamientos 5 y 6, respectivamente. En el segundo corte, hubo mayores diferencias entre los tratamientos. El tratamiento control registró un área foliar de $177 \text{ cm}^2/\text{planta} \cdot \text{parcela}$, lo que evidencia un desempeño menor frente al tratamiento 5, que alcanzó $385 \text{ cm}^2/\text{planta} \cdot \text{parcela}$. El tratamiento 5 presentó la mejor respuesta al digerido aplicado.

Los resultados obtenidos evidencian el impacto positivo de las diluciones de digerido en el desarrollo foliar. El desarrollo foliar se atribuye principalmente a la disponibilidad de nutrientes esenciales, como el nitrógeno y el fósforo. El nitrógeno es un componente clave en la formación de clorofila y proteínas, que son fundamentales para la fotosíntesis y el crecimiento vegetativo (Arteaga et al. 2019; Ueda, Konishi, y Yanagisawa, 2017), mientras que el fósforo favorece el desarrollo de las raíces, la transferencia de energía y la formación de estructuras celulares (Malaver González y Rincón Zabala, 2021). Las diluciones de digerido mejoran las condiciones morfológicas y desarrollo vegetal de las plantas, como el incremento en el área foliar, mientras que

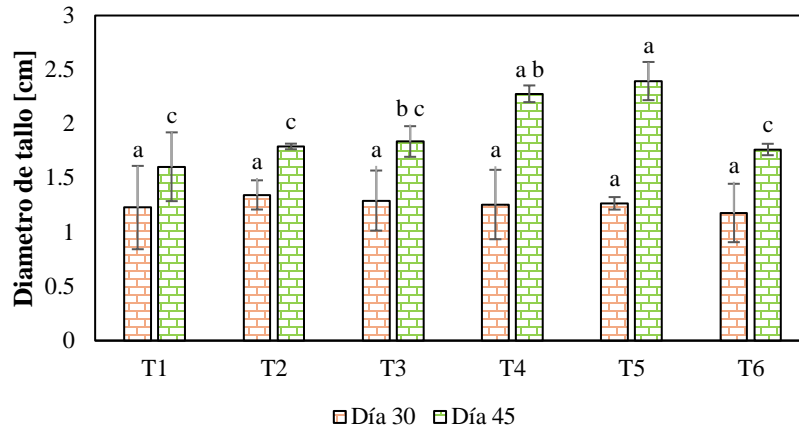
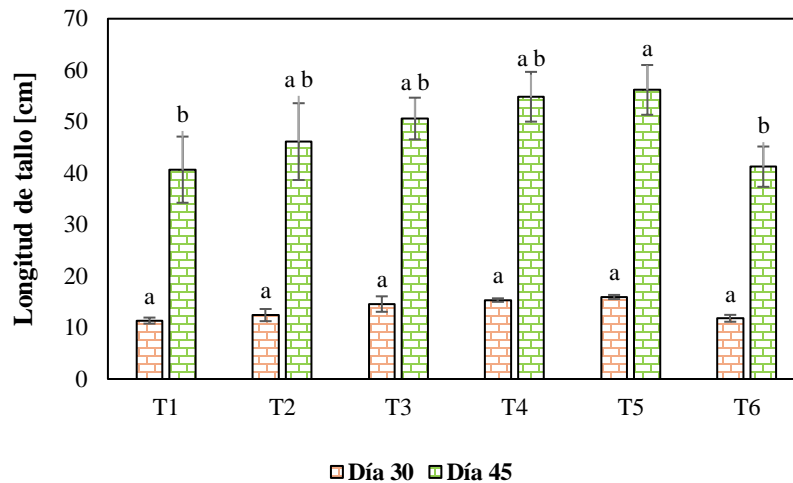
su aplicación sin diluir limita su desarrollo (L, 2021; Zarate Rivas, 2020). En la Figura 12 se presenta el incremento del área foliar en función del tiempo y los tratamientos.

Figura 11. Incremento del área foliar en función del tiempo y los tratamientos



Respecto al comportamiento de diámetro y largo del tallo, en la Figura 12 se puede observar que, en el primer corte, no hubo diferencias significativas entre los tratamientos. En el segundo corte se puede observar que el tratamiento 5 obtuvo el mejor desempeño para las variables de diámetro y largo de tallo con valores de 2,4 cm y 56,2 cm respectivamente. Asimismo, se puede observar una tendencia similar para las dos variables, presentando un crecimiento en función de la concentración de digerido desde el tratamiento 1 hasta el tratamiento 5. El tratamiento 6 tuvo un desempeño similar al tratamiento 1, asociado a las limitaciones de aplicar digerido sin diluir.

En la Figura 13 y la Figura 14 se presenta el comportamiento de diámetro y largo de tallo respectivamente.

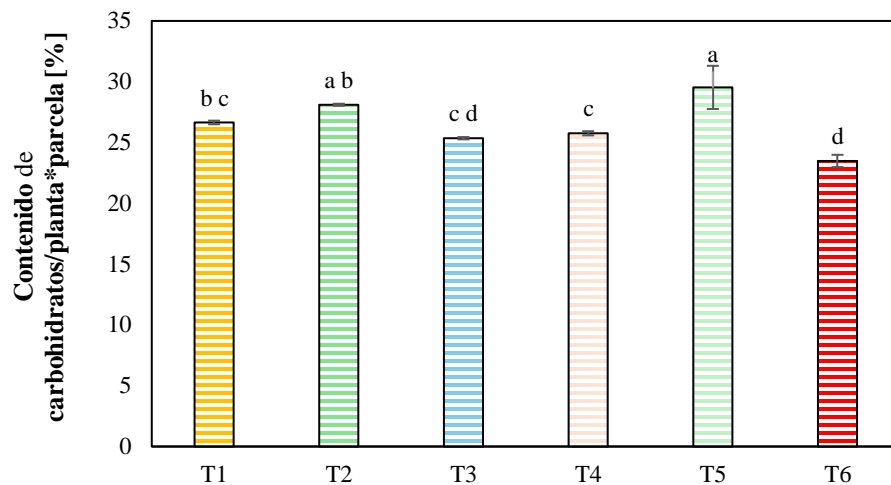
Figura 12. *Comportamiento de diámetro de tallo***Figura 13.** *Comportamiento de longitud de tallo*

En este estudio, la irrigación con digerido indicó un mejor desarrollo vegetal en comparación con el tratamiento control. Asimismo, entre los tratamientos, se registraron incrementos en variables como altura de tallo, diámetro de tallo, biomasa seca y área foliar a medida que aumentaba la concentración aplicada. Estos resultados confirman el impacto positivo del uso de digerido en diluciones sobre el desarrollo morfológico y el rendimiento productivo del pasto de corte.

4.3.2 Análisis bromatológico

En el análisis bromatológico se presenta el contenido porcentual de carbohidratos, proteínas y fibras de planta por parcela. En la Figura 15 se presenta el contenido porcentual de carbohidratos por planta por parcela.

Figura 14. Contenido porcentual de carbohidratos por planta en función de los tratamientos aplicados.

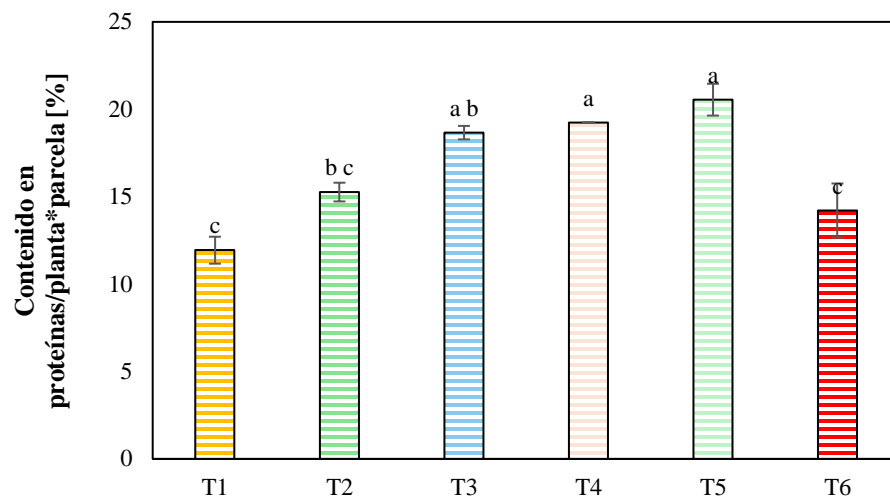


Respecto al contenido de carbohidratos, se observó que las plantas irrigadas con el tratamiento 5 presentaron el mejor desempeño (29,5%) frente a los demás tratamientos. Cuando el digerido se aplica diluido, los nutrientes, como nitrógeno, fósforo y potasio, favorecen la fotosíntesis y el metabolismo de los carbohidratos (Apollon et al., 2022). Además, la dilución reduce la acumulación de sales en el suelo, evitando condiciones de estrés osmótico que podrían limitar la absorción de agua y nutrientes (Arteaga et al., 2019). Por el contrario, la aplicación del tratamiento 6 (digerido sin diluir) puede haber generado un exceso de nitrógeno. Asimismo, el alto contenido

de sales y compuestos orgánicos no diluidos podría haber alterado las condiciones químicas y físicas del suelo, dificultando el desarrollo del cultivo y reduciendo el desempeño del tratamiento 6.

En la Figura 16 se presenta el contenido porcentual de proteínas por planta en función de los tratamientos aplicados.

Figura 15. *Contenido porcentual de proteínas por planta en función de los tratamientos aplicados.*

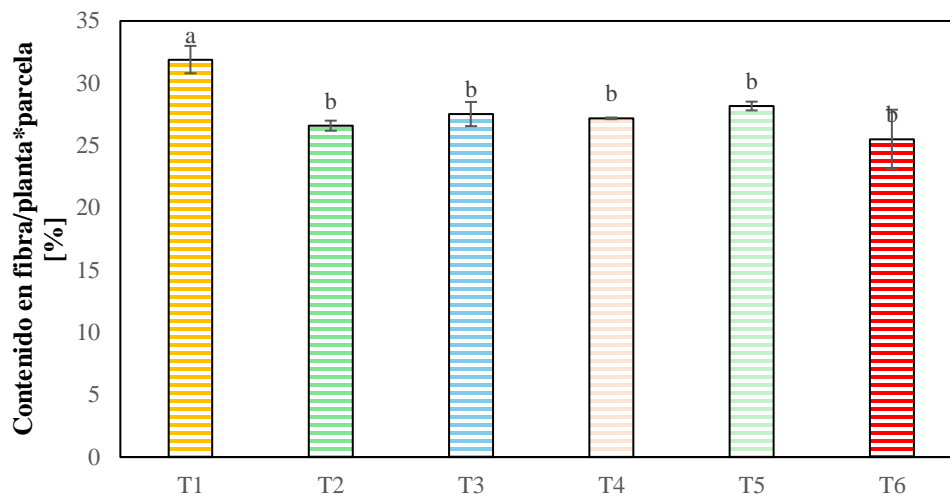


Respecto al contenido de proteínas, se puede observar que, el tratamiento 5 presenta un mejor desempeño en el cultivo. Adicionalmente, existe una relación directamente proporcional entre el tratamiento 1 y 5, es decir, a mayor contenido de digerido en la dilución aplicada, la planta contiene un mayor contenido de proteínas. Esto se da porque el digerido es rico en nitrógeno, elemento necesario para la formación de aminoácidos y síntesis de proteínas. Sin embargo, también se observa que el tratamiento 6 presenta un menor desempeño respecto al tratamiento 5. A pesar de que la planta presenta una respuesta favorable al aumentar la concentración de digerido en la dilución, un exceso de nitrógeno conlleva a la acumulación de este elemento en las raíces. La

acumulación de nitrógeno en las raíces afecta la fotosíntesis, en consecuencia, la síntesis de proteínas en una planta.

En la Figura 17 se presenta el contenido porcentual de fibra por planta en función de los tratamientos aplicados.

Figura 16. *Contenido porcentual de fibra por planta en función de los tratamientos aplicados*



El contenido de fibra en el cultivo no presentó incremento a partir de la irrigación con digerido en diferentes concentraciones y el tratamiento control presentó mejor desempeño en el cultivo. Al aplicar el digerido en diferentes concentraciones, el nitrógeno presente favoreció las condiciones de crecimiento vegetal (área foliar, tallo, hoja), lo cual pudo alterar la relación entre el contenido de fibra y demás componentes de la planta (Roa María, 2011). En pastos de corte, esto podría resultar en una menor concentración de fibra en las primeras etapas del crecimiento, pero un exceso prolongado puede provocar un aumento en la lignificación, lo que puede incrementar la fibra en plantas más maduras (Roa María, 2011).

4.4 Análisis Económico

El biogás producido en Villa Porkinos cuenta con características que lo hacen óptimo para su aprovechamiento energético. La producción promedio es de 17 Nm³/día, con un contenido de metano del 71%, lo que le otorga un poder calorífico aproximado de 6,5 kWh/m³ (Tilley, 2018). Estas propiedades permiten que el biogás sea una alternativa eficiente para sustituir combustibles tradicionales. Por ejemplo, 1 m³ de biogás tiene un equivalente energético a 1,3 kg de madera, 0,65 litros de gasóleo, 0,6 m³ de gas natural, 0,24 m³ de GLP o 0,7 kg de carbón (Morales y Gámez, 2022; Romero, 2017). La Tabla 14 (Min energía, 2011) presenta un análisis más detallado, evidenciando su potencial como fuente de energía renovable, contribuyendo a la valorización de residuos y a la reducción del uso de combustibles fósiles.

Tabla 14. *Análisis biogás vs otras fuentes de combustión*

Valores	Biogás	Gas Natural	GLP	Gas Metano	Hidrógeno
Valor calórico (kWh/m ³)	6,5	10	26	10	3
Densidad (t/m ³)	1,08	0,7	2,01	0,72	0,09
Máxima velocidad de encendido en el aire (m/s)	0,31	0,39	0,42	0,47	0,43
Límite de explosión (% de gas en el aire)	6-12	5-15	2-10	5-15	4-80

Nota. Adaptado de Manual de Biogás, por Min energía, 2011, p.55, FAO

Aunque en la finca su uso se ha limitado principalmente a la cocina doméstica, el biogás tiene el potencial de diversificar su aplicación hacia otros procesos energéticos. Entre las posibles alternativas se encuentra su utilización para generar electricidad que impulse las bombas necesarias para transportar el digerido y el agua de riego (Min energía, 2011), así como para alimentar sistemas de calefacción en las cocheras, optimizando las condiciones para el bienestar animal. Además, podría ser compartido con fincas aledañas, generando beneficios económicos y sociales al reducir

los costos por consumo de gas en pipetas y disminuir el impacto ambiental asociado a la quema de carbón y la tala de árboles como fuente de combustible.

El impacto económico derivado de la implementación del sistema de DA en la finca se evaluó mediante un análisis detallado de ingresos y costos, considerando tanto el gasto de capital (CAPEX) como los costos operativos (OPEX). En términos de ingresos, se contemplaron los ahorros generados por la sustitución del gas licuado de petróleo (GLP) utilizado para cocinar, así como el potencial ahorro en fertilizantes mediante el uso del digerido. Este último fue comparado con la urea, el fertilizante comercial más empleado en la región.

Para los costos de capital (CAPEX), se incluyó la inversión en el sistema completo de DA, que considera los equipos principales (biodigestor, tuberías para líquidos y gases, contador de gas, tanques de almacenamiento, bombas, aspersores) y la obra civil necesaria. Los costos operativos (OPEX) consideraron los gastos relacionados con el mantenimiento del sistema y su operación continua. En la Tabla 15 se detalla el análisis económico.

Tabla 15. *Análisis CAPEX-OPEX*

Factor Económico	Ítem de análisis	Valor anual en COP
Ingresos	Biogás	\$2.122.110
	Digerido	\$12.073.140
CAPEX	Biodigestores	\$36.000.000
	Obras civiles	\$8.242.000
	Otros equipos	\$27.758.000
OPEX	Mantenimiento	\$1.800.000

Para el cálculo de los ingresos anuales generados por el biogás, se consideró un cilindro de 40 lb de GLP con una duración aproximada de 20 días de uso (El Tiempo, 2024), cuyo costo es de

\$116.280 COP en el municipio de Lebrija (Vida gas, 2024). En cuanto al ahorro generado por el uso del digerido, se comparó con el fertilizante Urea Prill 46%, empleando 15 gramos por metro cuadrado (Agroalsa, 2021) en las 30 hectáreas sembradas en Villa Porkinos, teniendo en cuenta que una bolsa de 50 kg tiene un precio de \$134.146 COP (La casa del granjero, 2025).

Para calcular los CAPEX (gastos de capital), se incluyó el precio de compra de los 4 biodigestores, cada uno de 40 m³, consultado directamente con la empresa proveedora. Las obras civiles fueron valoradas en el equivalente a 4 salarios mínimos de 2025, considerando la construcción de una caja de grasas, un tanque de alimentación, un tanque de digerido y las demás adecuaciones del terreno. Además, el costo de instalación de \$400 dólares fue informado por la empresa proveedora de los biodigestores.

En el caso de los OPEX (gastos operativos), se consideró un costo anual de mantenimiento equivalente al 5% del valor de la batería de biodigestores, destinado a cubrir los arreglos necesarios para su correcto funcionamiento.

Para los indicadores económicos VPN, TIR y PRI, se consideró un horizonte de 20 años, acorde con la vida útil mínima estimada de un biodigestor, que varía entre 20 y 25 años (Sistema Bio, 2023). Se utilizó una tasa mínima atractiva de retorno (TMAR) del 10%, cercana a la tasa efectiva anual del Banco de la República, y los precios fueron proyectados con una inflación del 5,20% estimada para 2025. Adicionalmente, se aplicó una depreciación del 10% a los equipos involucrados.

Tabla 16. *Indicadores económicos*

VPN	TIR	PRI
\$107.380.315	28,30%	4 años

El análisis económico demuestra que el proyecto tiene un VPN positivo de \$107.308.315 COP, lo que indica que los flujos de efectivo generados superan ampliamente la inversión inicial, agregando valor al negocio. Este resultado se encuentra respaldado por una TIR del 28,30%, significativamente superior a la Tasa Mínima Aceptable de Retorno (TMAR) del 10%, lo cual refuerza su rentabilidad. Por su parte, el PRI es de 4 años, situándose dentro del horizonte estimado del proyecto de 20 años, garantizando una recuperación rápida de los recursos invertidos.

El proyecto no solo garantiza la viabilidad económica mediante el aprovechamiento del digerido, sino que también optimiza la eficiencia productiva del pasto de corte al actuar como un suplemento orgánico. Además, la integración de tecnología de DA contribuye a la gestión eficiente de residuos agroindustriales, promoviendo la sostenibilidad operativa y reduciendo costos a largo plazo, lo que refuerza el enfoque técnico y rentable de la propuesta.

5 Conclusiones

En diagnóstico de la operación de la batería de biodigestores de Villa Porkinos demostró que aun cuando no tiene estandarizado el caudal de alimentación; el agua de lavado de las cocheras es apto para producir un biogás con excelente calidad (71% de CH₄).

La caracterización fisicoquímica, microbiológica y de metales del digerido al ser confrontada con la Norma NTC 5167 y la OMS indico que su tipología no permite clasificarlo como un fertilizante líquido. Sin embargo, el digerido contiene 1,70 g/L de nitrógeno total, 2,80 g/L de fósforo total y 0,5 g/L de potasio total, componentes favorables para cultivos y por lo tanto puede usarse como agua de riego (fertirriego) a una dilución de 40% en agua.

El uso de digerido sin diluir en el cultivo de pasto de corte Taiwán conlleva a la inhibición del crecimiento de la planta. Sin embargo, utilizar el digerido a dilución del 40 % en agua conlleva a mejor desarrollo vegetal y mayor contenido de proteínas y carbohidratos a comparación de los demás tratamientos.

La implementación de la DA en Villa Porkinos permite gestionar los residuos de estiércol porcino entregando biogás y el digerido con uso en fertirriego para el cultivo de pasto Taiwán. Así las cosas, la productividad del pasto Taiwán mediante el uso del digerido como fertirriego, reduce costos en fertilizantes comerciales. El análisis económico muestra un VPN de \$107.308.315 COP, una TIR del 28,30% y un PRI de 4 años, confirmando la rentabilidad del proyecto.

6 Recomendaciones

Se plantea la implementación de sistemas térmicos alimentados por biogás en Villa Porkinos, con el propósito de optimizar las condiciones térmicas en las instalaciones de la granja, promoviendo mejoras en el bienestar animal y humano.

Se considera fundamental evaluar la eficacia del digerido como fertirriego en otros cultivos como cítricos, con énfasis en su aplicación en regiones productoras de limón y piña, como Lebrija, para determinar su desempeño agronómico y su contribución a la productividad agrícola.

Se recomienda a la empresa acondicionar la batería de biodigestores con instrumentación que permita un mejor control de los caudales (ubicación de las tuberías en el tanque de alimentación y la caja de grasas, e instalar un sistema de agitación).

Referencias Bibliográficas

- Acosta Nieto, Angie Andrea, y Maria Jose Uribe Muñoz. 2024. «Obtención de estruvita a partir del digerido producido en la digestión anaerobia de estiércol porcino en clima frío».
- Acosta, Yaniris Lorenzo. 2005. «La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I».
- Aguilera, Edwin Antonio Reyes. 2016. «Producción de biogas a partir de Biomasa». *Revista Científica Estelí* (17):11-22. doi: 10.5377/farem.v0i17.2610.
- Albuquerque, José Antonio, Carlos de la Fuente, Alicia Ferrer-Costa, Lucía Carrasco, Juan Cegarra, Manuel Abad, y María Pilar Bernal. 2012a. «Assessment of the fertiliser potential of digestates from farm and agroindustrial residues». *Biomass and Bioenergy* 40:181-89. doi: 10.1016/j.biombioe.2012.02.018.
- Albuquerque, José Antonio, Carlos de la Fuente, Alicia Ferrer-Costa, Lucía Carrasco, Juan Cegarra, Manuel Abad, y María Pilar Bernal. 2012b. «Assessment of the fertiliser potential of digestates from farm and agroindustrial residues». *Biomass and Bioenergy* 40:181-89. doi: 10.1016/j.biombioe.2012.02.018.
- Angelidaki, I., K. Boe, y L. Ellegaard. 2005. «Effect of operating conditions and reactor configuration on efficiency of full-scale biogas plants». *Water Science and Technology* 52(1-2):189-94. doi: 10.2166/wst.2005.0516.
- Apollon, Wilgince, Yviane Jean-Baptiste, Birmania J. Wagner, Alejandro Isabel Luna-Maldonado, Héctor Silos-Espino, Wilgince Apollon, Yviane Jean-Baptiste, Birmania J. Wagner, Alejandro Isabel Luna-Maldonado, y Héctor Silos-Espino. 2022. «Efecto de la fertilización

orgánica e inorgánica en la producción y calidad de *Brachiaria brizantha*». *Revista mexicana de ciencias agrícolas* 13(1):1-13. doi: 10.29312/remexca.v13i1.2637.

Arango Bedoya, Oscar, y Luciana Sanches E Sousa. 2009. «TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA LÁCTEA EN SISTEMAS ANAEROBIOS TIPO UASB». *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial* 7(2):24-31.

Archila Menco, Angi Karina. 2021. «Codigestión anaeróbica de las aguas residuales rojas e implementación de una membrana contactor en la digestión anaeróbica de gallinaza de jaula como alternativas de mitigación del amoníaco».

Arteaga, Dídimo Vera, Galo Cedeño García, George Cedeño-García, Jessica Cargua Chávez, María Garay Lugo, Dídimo Vera Arteaga, Galo Cedeño García, George Cedeño-García, Jessica Cargua Chávez, y María Garay Lugo. 2019. «EFICIENCIA AGRONÓMICA DE NITRÓGENO Y PRODUCCIÓN DE *Cynodon plectostachyus* (K. Schum.) Pilg. EN FUNCIÓN DE DOS FRECUENCIAS DE CORTE». *Chilean journal of agricultural & animal sciences* 35(3):251-60. doi: 10.4067/S0719-38902019005000405.

Bugiolacchio, Romina. 2020. «Uso de digerido anaeróbico de feedlot como fertilizante: efecto sobre el crecimiento de raigras perenne en dos suelos contrastantes del sudoeste bonaerense.»

Calzada-Marín, Jesús Miguel, Javier Francisco Enríquez-Quiroz, Alfonso Hernández-Garay, Eusebio Ortega-Jiménez, y Sergio I. Mendoza-Pedroza. 2014. «Análisis de crecimiento del pasto maralfalfa (*Pennisetum* sp.) en clima cálido subhúmedo». *Revista mexicana de ciencias pecuarias* 5(2):247-60.

Castaño. 2022. «Foto 241131984, (c) Samuel Trujillo Castaño, todos los derechos reservados, subido por Samuel Trujillo Castaño · NaturaLista Colombia». *NaturaLista Colombia*. Recuperado 24 de enero de 2025 (<https://colombia.inaturalist.org/photos/241131984>).

Castro, L., H. Escalante, J. Jaimes-Estévez, L. J. Díaz, K. Vecino, G. Rojas, y L. Mantilla. 2017. «Low Cost Digester Monitoring under Realistic Conditions: Rural Use of Biogas and Digestate Quality». *Bioresource Technology* 239:311-17. doi: 10.1016/j.biortech.2017.05.035.

Castro-Molano, Liliana del Pilar, Humberto Escalante-Hernández, Oscar Julián Gómez-Serrato, y Diana Paola Jiménez-Piñeros. 2016. «Análisis del potencial metanogénico y energético de las aguas residuales de una planta de sacrificio bovino mediante digestión anaeróbica». *DYNA* 83(199):41-49. doi: 10.15446/dyna.v83n199.56796.

Catholic Relief Services. s. f.-a. «Manual pastos y forrajes CRS USDA CIAT 2015 - Pastos Programa de Gestión Rural Empresarial, Sanidad - Studocu». Recuperado 20 de enero de 2025 (<https://www.studocu.com/co/document/universidad-de-la-amazonia/biologia/manual-pastos-y-forrajes-crs-usda-ciat-2015/88879081>).

Catholic Relief Services. s. f.-b. «Manual pastos y forrajes CRS USDA CIAT 2015 - Pastos Programa de Gestión Rural Empresarial, Sanidad - Studocu». Recuperado 14 de enero de 2025 (<https://www.studocu.com/co/document/universidad-de-la-amazonia/biologia/manual-pastos-y-forrajes-crs-usda-ciat-2015/88879081>).

Cordoba. s. f. «Influencia del inóculo en la digestión anaerobica de purín de cerdo». Recuperado 14 de enero de 2025 (<https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/58730>).

- Corredor, Yury Alexandra Vargas, y Liliana Ibeth Pérez Pérez. 2018. «Aprovechamiento de residuos agroindustriales en el mejoramiento de la calidad del ambiente». *Revista Facultad de Ciencias Básicas* 14(1):59-72. doi: 10.18359/rfcb.3108.
- Cucina, Mirko, Liliana Castro, Humberto Escalante, Ivet Ferrer, y Marianna Garfi. 2021a. «Benefits and risks of agricultural reuse of digestates from plastic tubular digesters in Colombia». *Waste Management* 135:220-28. doi: 10.1016/j.wasman.2021.09.003.
- Cucina, Mirko, Liliana Castro, Humberto Escalante, Ivet Ferrer, y Marianna Garfi. 2021b. «Benefits and risks of agricultural reuse of digestates from plastic tubular digesters in Colombia». *Waste Management* 135:220-28. doi: 10.1016/j.wasman.2021.09.003.
- Dottavio, Ana María, y Ricardo José Di Masso. 2010. «Mejoramiento avícola para sistemas productivos semi-intensivos que preservan el bienestar animal». *BAG. Journal of basic and applied genetics* 21(2):0-0.
- Emino, Everett R., y Phil R. Warman. 2004. «Biological Assay for Compost Quality». *Compost Science & Utilization* 12(4):342-48. doi: 10.1080/1065657X.2004.10702203.
- Garfi, Marianna, Liliana Castro, Neus Montero, Humberto Escalante, y Ivet Ferrer. 2019. «Evaluating Environmental Benefits of Low-Cost Biogas Digesters in Small-Scale Farms in Colombia: A Life Cycle Assessment». *Bioresource Technology* 274:541-48. doi: 10.1016/j.biortech.2018.12.007.
- Garfi, Marianna, Pau Gelman, Jordi Comas, William Carrasco, y Ivet Ferrer. 2011. «Agricultural reuse of the digestate from low-cost tubular digesters in rural Andean communities». *Waste Management* 31(12):2584-89. doi: 10.1016/j.wasman.2011.08.007.

- Gómez-Brandón, María, Marina Fernández-Delgado Juárez, Jorge Domínguez, Heribert Insam, María Gómez-Brandón, Marina Fernández-Delgado Juárez, Jorge Domínguez, y Heribert Insam. 2013. «Animal Manures: Recycling and Management Technologies». en *Biomass Now - Cultivation and Utilization*. IntechOpen.
- Gunay, Ahmet, y Dogan Karadag. 2015. «Recent developments in the anaerobic digestion of olive mill effluents». *Process Biochemistry* 50(11):1893-1903. doi: 10.1016/j.procbio.2015.07.008.
- Holliger, Christof, Madalena Alves, Diana Andrade, Irimi Angelidaki, Sergi Astals, Urs Baier, Claire Bougrier, Pierre Buffière, Marta Carballa, Vinnie de Wilde, Florian Ebertseder, Belén Fernández, Elena Ficara, Ioannis Fotidis, Jean-Claude Frigon, Hélène Fruteau de Laclos, Dara S. M. Ghasimi, Gabrielle Hack, Mathias Hartel, Joern Heerenklage, Ilona Sarvari Horvath, Pavel Jenicek, Konrad Koch, Judith Krautwald, Javier Lizasoain, Jing Liu, Lona Mosberger, Mihaela Nistor, Hans Oechsner, João Vítor Oliveira, Mark Paterson, André Pauss, Sébastien Pommier, Isabella Porqueddu, Francisco Raposo, Thierry Ribeiro, Florian Rüschi Pfund, Sten Strömberg, Michel Torrijos, Miriam van Eekert, Jules van Lier, Harald Wedwitschka, y Isabella Wierinck. 2016. «Towards a standardization of biomethane potential tests». *Water Science and Technology* 74(11):2515-22. doi: 10.2166/wst.2016.336.
- Icontec. s. f.-a. «Productos para la industria agrícola. productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo.» Recuperado 20 de enero de 2025 (<https://tienda.icontec.org/gp-ntc-productos-para-la-industria-agricola-productos->

organicos-usados-como-abonos-o-fertilizantes-y-enmiendas-o-acondicionadores-de-suelo-ntc5167-2022.html).

Icontec. s. f.-b. «Productos para la industria agrícola. productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo.» Recuperado 10 de enero de 2025 (<https://tienda.icontec.org/gp-ntc-productos-para-la-industria-agricola-productos-organicos-usados-como-abonos-o-fertilizantes-y-enmiendas-o-acondicionadores-de-suelo-ntc5167-2022.html>).

Inia, Instituto Nacional de Investigación Agraria-. 2008. «Producción y uso del biol - Proyecto Perú conservación in situ de los cultivos nativos y sus parientes silvestres PER/98/G33».

Jaimes-Estévez, Jaime. 2024. «Mejoramiento de La Biometanización Psicrófila de Lactosuero Mediante El Uso de Biochar Como Soporte Orgánico».

Jaimes-Estévez, Jaime, Erik Vera Mercado, Juan G. Jaramillo, Paula Rodríguez, Jaime Martínez-Herrero, Humberto Escalante, y Liliana Castro. 2022. «From laboratory to farm-scale psychrophilic anaerobic co-digestion of cheese whey and cattle manure». *Bioresource Technology Reports* 19:101168. doi: 10.1016/j.biteb.2022.101168.

Jobling Purser, B. J., S. M. Thai, T. Fritz, S. R. Esteves, R. M. Dinsdale, y A. J. Guwy. 2014. «An improved titration model reducing over estimation of total volatile fatty acids in anaerobic digestion of energy crop, animal slurry and food waste». *Water Research* 61:162-70. doi: 10.1016/j.watres.2014.05.020.

- Kim, Moonil, Young-Ho Ahn, y R. E. Speece. 2002. «Comparative process stability and efficiency of anaerobic digestion; mesophilic vs. thermophilic». *Water Research* 36(17):4369-85. doi: 10.1016/S0043-1354(02)00147-1.
- Kinyua, Maureen N., Laurel E. Rowse, y Sarina J. Ergas. 2016. «Review of small-scale tubular anaerobic digesters treating livestock waste in the developing world». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 58:896-910. doi: 10.1016/j.rser.2015.12.324.
- Kovačić, Đurđica. s. f. «Digestate Management and Processing Practices: A Review». Recuperado 30 de diciembre de 2024 (<https://www.mdpi.com/2076-3417/12/18/9216>).
- Kovačić, Đurđica, Zdenko Lončarić, Jurica Jović, Danijela Samac, Brigita Popović, y Marina Tišma. 2022. «Digestate Management and Processing Practices: A Review». *Applied Sciences* 12(18):9216. doi: 10.3390/app12189216.
- L, Edgar Alexis Polo. 2021. «EFECTO DE LA APLICACIÓN DE ABONO ORGÁNICO EN LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA Y CALIDAD NUTRITIVA DE PASTO GUATEMALA (*Tripsacum laxum*), BAJO DOS FRECUENCIAS DE CORTE.» *Revista Saberes APUDEP* 4(2):18-27.
- La casa del granjero. 2024. «Urea 46-0-0 Abono para Jardinería 50kg – La Casa del Granjero». Recuperado 19 de enero de 2025 (https://lacasadelgranjero.com/products/urea-46-0-0-abono-para-jardineria-50kg?srsId=AfmBOooCavuNondbSPm2EcjnSQognR-BIttk_RxVvj1jzJpdnQy-MHCY).
- Lamolinará, Barbara, Amaury Pérez-Martínez, Estela Guardado-Yordi, Christian Guillén Fiallos, Karel Diéguez-Santana, y Gerardo J. Ruiz-Mercado. 2022. «Anaerobic digestate

management, environmental impacts, and techno-economic challenges». *Waste Management* 140:14-30. doi: 10.1016/j.wasman.2021.12.035.

Malaver González, Nicolás, y Pedro Esteban Rincón Zabala. 2021. «Evaluación de diferentes fuentes y dosis de nitrógeno y fosforo en el sistema de pasturas (pennisetum purpureum) pasto elefante».

Marin-Batista, José Daniel, Liliana Castro, y Humberto Escalante. 2015. «Efecto de la carga orgánica de la gallinaza de jaula en el potencial de biometanización». *Revista Colombiana de Biotecnología* 17(1):18-23. doi: 10.15446/rev.colomb.biote.v17n1.39971.

Martínez, Dayro Enrique Cortes, y Oscar Javier Olarte Blandon. 2018. «Pasto de corte king grass morado (Pennisetum Purpureum x Pennisetum Typhoides), una esperanza forrajera en la colonia agrícola de Acacias». *Documentos de Trabajo ECAPMA* 2(1). doi: 10.22490/ECAPMA.2772.

Martinez Garcia, Douglas Antonio, y Kevin Antonio Leiva Estrada. 2019. «Efecto del biol sobre la producción de biomasa y calidad del pasto Maralfalfa (Pennisetum sp), en un segundo rebrote, Centro Experimental El Plantel, 2018». engineer, Universidad Nacional Agraria.

Martínez-Villavicencio, Nallely, Carlos V. López-Alonzo, Ramona Pérez-Leal, y Moisés Basurto-Sotelo. 2011. «Efectos por salinidad en el desarrollo vegetativo: Effects of salinity on vegetative growth». *TECNOCENCIA Chihuahua* 5(3):156-61. doi: 10.54167/tch.v5i3.694.

Min. energía. s. f. «Biogás y Biometano». *Min. energía*. Recuperado 19 de enero de 2025 (<https://www.minenergia.gov.co/es/misional/hidrocarburos/funcionamiento-del-sector/biog%C3%A1s-y-biometano/>).

Molano, Liliana del Pilar Castro, Yilber Alexander Parrales Ramírez, y Humberto Escalante Hernández. 2019. «Co digestión anaerobia de estiércoles bovino, porcino y equino como alternativa para mejorar el potencial energético en digestores domésticos». *Revista ION* 32(2):29-40. doi: 10.18273/revion.v32n2-2019003.

Morales, Isaac Gregorio Castro, y María Rodríguez Gámez. 2022. «Potencial de producción de biogás para su aprovechamiento energético en el contexto rural de Manabí». *Ingeniería Energética* XLIII(3):62-70.

Muñoz Muñoz, Alexander. 2024. «Calidad del digerido obtenido de un proceso de codigestión anaerobia suplementado con biochar a condiciones psicrotróficas».

Novelo, R. Méndez, E. Castillo Borges, E. Vázquez Borges, O. Briceño Pérez, V. Coronado Peraza, R. Pat Canul, y P. Garrido Vivas. 2009. «Estimación del potencial contaminante de las granjas porcinas y avícolas del estado de Yucatán».

OMS. s. f. «Saneamiento». Recuperado 20 de enero de 2025 (<https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/sanitation>).

Parra Huertas, Ricardo Adolfo. 2015. «Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria». *Producción + Limpia* 10(2):142-59.

- Pérez, Andrea, y Patricia Torres Lozada. 2011. «Índices de alcalinidad para el control del tratamiento anaerobio de aguas residuales fácilmente acidificables.»
- Piadeh, Farzad, Ikechukwu Offie, Kouros Behzadian, Joseph P. Rizzuto, Angela Bywater, José-Rodrigo Córdoba-Pachón, y Mark Walker. 2024. «A Critical Review for the Impact of Anaerobic Digestion on the Sustainable Development Goals». *Journal of Environmental Management* 349:119458. doi: 10.1016/j.jenvman.2023.119458.
- PorkColombia. s. f. «La porcicultura colombiana sigue destacándose en el desarrollo agropecuario del país – Porkcolombia». Recuperado 30 de diciembre de 2024 (<https://porkcolombia.co/comunicados/la-porcicultura-colombiana-sigue-destacandose-en-el-desarrollo-agropecuario-del-pais/>).
- Posada, Fánor Casierra, Juan José Rivera, y Luis Augusto Ocampo. s. f. «Descripción del sistema agropastoril guayaba- pastos ganadería en el Tolima/Colombia».
- Ramos-Trejo, O., J. R. Canul-Solis, y F. J. Duarte-Vera. s. f. «Producción de tres variedades de *Pennisetum purpureum* fertilizadas con dos diferentes fuentes nitrogenadas en Yucatán, México». *Revista Bio Ciencias* 2(2). doi: 10.15741/revbio.02.02.07.
- Roa Maria. 2011. «Digestibilidad de forrajes arbóreos en bovinos utilizando jaulas metabólicas | Revista Sistemas de Producción Agroecológicos». Recuperado 24 de enero de 2025 (<https://revistas.unillanos.edu.co/index.php/sistemasagroecologicos/article/view/578>).
- Singh, B. P., H. P. Singh, y E. Obeng. 2013. «Elephantgrass.» Pp. 271-91 en *Biofuel crops: production, physiology and genetics*, CABI Books.

Sistema BIO. s. f. «Inicio - Sistema.bio». *Sistema BIO*. Recuperado 19 de enero de 2025 (<https://sistema.bio/es/>).

Tavera-Ruiz, C., J. Martí-Herrero, O. Mendieta, J. Jaimes-Estévez, P. Gauthier-Maradei, U. Azimov, H. Escalante, y L. Castro. 2023. «Current understanding and perspectives on anaerobic digestion in developing countries: Colombia case study». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 173:113097. doi: 10.1016/j.rser.2022.113097.

Tiempo. s. f. «EL GAS REGRESARÁ EN CUATRO DÍAS». Recuperado 19 de enero de 2025 (<https://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-644706>).

Tilley. 2018. «TILLEY Et Al 2018. Compendio de Sistemas y Tecnologías de Saneamiento | PDF | Saneamiento | Sustentabilidad». Recuperado 19 de enero de 2025 (<https://es.scribd.com/document/482512510/TILLEY-et-al-2018-Compendio-de-sistemas-y-tecnologias-de-saneamiento>).

Tiquia, S. M. 2000. «Evaluating Phytotoxicity of Pig Manure from the Pig-on-Litter System».

Ueda, Yoshiaki, Mineko Konishi, y Shuichi Yanagisawa. 2017. «Molecular basis of the nitrogen response in plants». *Soil Science and Plant Nutrition* 63(4):329-41. doi: 10.1080/00380768.2017.1360128.

Vidagas. 2023. «Vidagas». Recuperado 19 de enero de 2025 (<https://www.vidagas.co/>).

Warnock, Rosemary, Jagger Valenzuela, América Trujillo, Petra Madriz, y Margaret Gutiérrez. 2006. «Área foliar, componentes del área foliar y rendimiento de seis genotipos de caraota¹». *Agronomía Tropical* 56(1):21-42.

Yaniris Lorenzo. s. f. «(PDF) La Digestión Anaerobia. Aspectos Teóricos. Parte I». *ResearchGate*.

Recuperado 14 de enero de 2025

(https://www.researchgate.net/publication/237030002_La_digestion_anaerobia_Aspectos_teoricos_Parte_I).

Yenigün, Orhan, y Burak Demirel. 2013. «Ammonia inhibition in anaerobic digestion: A review».

Process Biochemistry 48(5):901-11. doi: 10.1016/j.procbio.2013.04.012.

Zarate Rivas, Jugling Dayanara. 2020. «Efectos de la aplicación de Bioestimulantes en el pasto

janeiro (*Erioclhoa polystachya*) en la zona de Babahoyo»». bachelorThesis, BABAHOYO:

UTB, 2020.

Aprendice

Apéndice A. Tabla comparativa de efecto de aplicación del digerido en el suelo

Parámetro		Unidad	Sin digerido	Con digerido (60% digerido, 40% agua)
pH		-	6,9	6,47
Capacidad de intercambio de cationes		meq/100g	17,2	19,6
Carbón orgánico		%	2	3,26
Fósforo disponible		ppm	524	650
Textura	Arena	%	30	24
	Limo		34	42
	Arcilla		36	34
Elementos mayores	Ca	meq/100g	11,2	16,7
	Mg		2,43	2,6
	Na		0,17	0,39
	K		1,66	1,95

La aplicación del digerido en el suelo en la mejor dilución para el crecimiento del pasto de corte demuestra una mejora en todos los parámetros químicos, permite capturar más carbono, mejora el rendimiento en NPK que es importante al momento de hablar de fertilizantes. Se recomienda realizar una aplicación más prolongada para poder observar mejor cambios en la textura ya que en ambas muestras el suelo fue franco-arcilloso.