



**EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE CODIGESTIÓN ANAEROBIA DE
RESIDUOS ORGÁNICOS AGROPECUARIOS GENERADOS POR LA
EMPRESA PALMERAS SAN PABLO S.A.S**

**Paula Alejandra Delgado Valencia
Manuel Esteban Quiroz Escobar**

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Ambiental
Bogotá, 2023

**EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE CODIGESTIÓN ANAEROBIA DE
RESIDUOS ORGÁNICOS AGROPECUARIOS GENERADOS POR LA
EMPRESA PALMERAS SAN PABLO S.A.S**

Paula Alejandra Delgado Valencia
Manuel Esteban Quiroz Escobar

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Ambiental

Director (a):
Wilmar Botello

Línea de Investigación:
Ingeniería para la sostenibilidad - grupo de investigación Agua, Salud y Ambiente

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Ambiental
Bogotá, Colombia
2023

Tabla de contenido

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
1.1 Pregunta de investigación	12
2. JUSTIFICACIÓN	12
3. OBJETIVOS	14
3.1 Objetivo general	14
3.2 Objetivos específicos	14
4. MARCO DE REFERENCIA	14
4.1 Marco teórico	14
4.2 Marco conceptual	18
4.3 Marco normativo	21
4.4 Marco institucional	23
4.5 Marco geográfico	24
4.5.1 Características generales	24
4.5.2 Material parental específico	25
4.5.3 Clima, temperatura y precipitación específica	25
4.5.4 Relieve en el área de estudio	26
4.5.5 Clasificación Agrológica de los suelos	26
4.5.6 Aire	27
4.5.7 Vereda “El Santuario”	27
4.5.8 Finca “San Pablo”	28
4.6 Estado del arte	29

5. METODOLOGÍA	31
5.1 Diseño metodológico	31
5.2 Metodología del objetivo específico N°1	33
5.2.1 Revisión de documentos	34
5.2.2 Diagnóstico del área de estudio	34
5.2.3 Cuantificación de los residuos porcinos y bovinos	35
5.2.3 Cuantificación de residuos vegetales	36
5.3 Metodología del objetivo específico N°2	37
5.4 Metodología del objetivo específico N°3	41
5.3.1 Determinación de sólidos volátiles y sólidos totales	42
5.3.2 Montaje del sistema a escala laboratorio a escala laboratorio	44
5.3.3 Estimación de biogás producido	45
5.4.1 Selección de proceso de codigestión de mejor rendimiento	46
5.4.2 Estimación energética	47
5.5 Plan de trabajo.	48
5.5.1 Esquematización etapas del trabajo	48
5.5.2 Cuadro metodológico	49
6. RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN	52
6.1 Objetivo específico 1.	52
6.1.1 Diagnóstico del área de estudio y aplicación de entrevista	52
6.1.2 Caracterización de residuos sólidos	53
6.1.3 Estimación del estiércol bovino	53
6.1.4 Estimación del estiércol porcino	54
6.1.5 Estimación del residuo vegetal	55
6.2 Objetivo específico 2.	57
6.3 Objetivo específico 3.	60
6.3.1 Determinación de sólidos volátiles (SV) y sólidos totales (ST)	60
6.3.2. Estimación de biogás producido	64
6.3.3. Selección de proceso de codigestión de mejor desempeño	66
6.3.4. Estimación energética	70
7. CONCLUSIONES	74

8. RECOMENDACIONES	76
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
10. ANEXOS	83

2. Listado de Tablas

Tabla 1. Marco normativo.	19
Tabla 2. Marco institucional.	20
Tabla 3. Variables definidas.	29
Tabla 4. Matriz de variables, técnicas e instrumentos para el desarrollo del tercer objetivo según dimensiones.	34
Tabla 5. Composición de los residuos sólidos orgánicos.	36
Tabla 6. Parámetros usados para la estimación del potencial de producción de energía eléctrica	37
Tabla 7. Matriz de variables, técnicas e instrumentos para el desarrollo del tercer objetivo según dimensiones.	38
Tabla 8. Proporciones de los tratamientos implementados..	42
Tabla 9. Metodología del proyecto.	47
Tabla 10. Aforo de estiércol bovino.	51
Tabla 11. Cantidad de estiércol bovino diario.	52
Tabla 12. Aforo de estiércol porcino.	52
Tabla 13. Cantidad de estiércol porcino diario.	52
Tabla 14. Censo de producción año 2022.	53
Tabla 15. Rendimiento en empresas palmicultoras.	54
Tabla 16. Constantes estimadas de los RSO.	54
Tabla 17. Potencial Bioquímico Teórico de Metano (TBPM) RSO con ajuste.	55
Tabla 18. Sólidos Volátiles de los RSO.	56
Tabla 19. Metano teórico total generado	57
Tabla 20. Metano teórico total generado por 72 g de sustrato	57
Tabla 21. Cantidad de estiércol porcino diario.	60
Tabla 22. Sólidos volátiles y sólidos totales de los lodos resultantes.	61
Tabla 23. Coeficiente de variación de cada reactor en diferente periodo.	66
Tabla 23. Datos obtenidos del sistema de codigestión anaerobia y su estimación energética.	70

3. Listado de Figuras

Figura 1. Etapas de la digestión anaeróbica.	19
Figura 2. Puerto Lleras-Meta.	22
Figura 3. Mapa de litología.	22
Figura 4. Mapa de clima.	23
Figura 5. Clasificación agrológica del suelo.	24
Figura 6. Vereda el santuario Puerto Lleras Meta.	25
Figura 7. PALMERAS SAN PABLO S.A.S	26
Figura 8. Esquema metodología del objetivo específico 1.	30
Figura 9. Encuesta diligenciada por uno de los trabajadores de la empresa.	32
Figura 10. Esquema metodología del objetivo específico 2.	35
Figura 11. Metodología para la determinación de sólidos volátiles y totales.	40
Figura 12. Prototipo de biodigestor ex situ.	41
Figura 13. Esquema metodología del objetivo específico 3.	43
Figura 14. Esquemmatización de las diferentes etapas del trabajo investigativo.	46
Figura 15. Diagnóstico inicial del lugar de estudio.	49
Figura 16. Prototipo de biodigestor escala laboratorio.	58
Figura 17. Proceso de caracterización de las propiedades físicas de los lodos resultantes.	61
Figura 18. Producción media diaria de biogás	62
Figura 19. Concentración de biogás en cada reactor.	64
Figura 20. Producción diaria de biometano (mL/d) durante el periodo operacional. La flecha indica el inicio del periodo de estabilidad operacional (C.V < 30%): T1=30,63%, T2=9,48%, T3=10,98%.	65
Figura 21. Concentración de biometano en los tres reactores.	67
Figura 22. Boxplot de la producción volumétrica de metano (PVM) obtenida para los tratamientos. T1= 1:2:1; T2=3:1:1 y T3= 1:1:1. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos (p<0,05).	68
Figura 23. Análisis ciclo de vida de los residuos en la empresa “PALMERAS SAN PABLO S.A.S”.	72

Resumen

Los residuos sólidos agropecuarios (RSA) constituyen una fuente de energía renovable, los cuales normalmente no se usufructúan en el medio rural. El objetivo del presente estudio fue evaluar la producción de biometano a partir de la co-digestión anaerobia (CA) de RSA, generados en la empresa “PALMERAS SAN PABLO S.A.S”, Puerto Lleras (Meta), a fin de establecer una alternativa de aprovechamiento energético. Para esto, se requirió un diagnóstico del tipo y cantidad de RSA generados en la empresa, distinguiendo el estiércol porcino y bovino (EP, EB) y los residuos vegetales (RV), como sustratos propensos de CA. Posteriormente se estimó la generación de biometano y las propiedades de los lodos resultantes evaluando tres tratamientos empleando diferentes proporciones de EP:EB:RV (T1=1:3:1; T2=3:1:1; T3=1:1:1) en un sistema operado a escala laboratorio durante 50 d a temperatura media de 30°C. Los resultados demostraron que la relación T3 resultó ser la más prometedora para su implementación en la zona de estudio,

presentando rendimientos de 151 mL CH_4 /gSV, con una concentración de 67%, y lodos con una relación SV/ST de 0,63. Se concluye que los RSA generados en el área de estudio pueden ser estabilizados por CA, adquiriendo energía renovable y lodos potencialmente aplicables como fertilizantes. Este estudio insta una contribución para el aprovechamiento de residuos orgánicos agropecuarios generados en la empresa, en el marco de la economía circular, el cual podría ser implementado en otros ámbitos rurales.

Palabras clave: Biogás, metanogénesis, metano, energía renovable, producción volumétrica de metano.

Abstract

Agricultural organic solid wastes (ASW) are valued as renewable energy sources that are not normally used in rural areas. The objective of this study is to evaluate the production of biomethane from the anaerobic co-digestion (AC) of ASW generated in the company "PALMERAS SAN PABLO S.A.S.", Puerto Lleras (Meta), in order to establish an alternative energy use. For this, a diagnosis of the type and quantity of ASW generated in the company was required, distinguishing swine and bovine manure (EP, EB) and vegetable residues (RV), as substrates prone to CA. Subsequently, biomethane generation and the properties of the resulting sludge were estimated by evaluating three treatments using different proportions of EP:EB:RV (T1=1:3:1; T2=3:1:1; T3=1:1:1) in a system operated at laboratory scale for 50 d at an average temperature of 30°C. The results showed that the T3 ratio proved to be the most promising for implementation in the study area, presenting yields of 151 mL CH_4 /gSV, with a concentration of 67%, and sludge with a SV/ST ratio of 0.63. It is concluded that the ASR generated in the study area can be stabilized by AC, acquiring renewable energy and sludge potentially applicable as fertilizer. This study establishes a contribution for the utilization of organic agricultural waste generated in the company, within the framework of the circular economy, which could be implemented by CA acquiring renewable energy and sludge potentially applicable as fertilizer. This study establishes a contribution to the use of organic agricultural waste generated in the company, within the framework of the circular economy, which could be implemented in other rural areas.

Keywords: Biogas, methanogenesis, methane, renewable energy, volumetric methane production.

Introducción

La situación energética mundial actual se caracteriza por un desequilibrio entre oferta y demanda. La energía se ha convertido en un factor limitante del desarrollo económico regional. La revolución energética del futuro próximo debe caracterizarse por dos aspectos principales: el suministro descentralizado, especialmente como suministro a comunidades vulnerables, y un enfoque en la sustitución de fuentes de energía de hidrocarburos por fuentes de energía que no aumenten las concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera. Estos cambios deben ir acompañados del despliegue a gran escala de las fuentes de energía no convencionales (Kazimierski, 2020).

Las energías alternativas son consideradas más sostenibles y respetuosas con el ambiente. Estas fuentes de energía alternativas se utilizan para generar electricidad y proporcionar energía para diversos usos, y suelen ser renovables o más limpias en comparación con las fuentes de energía convencionales. Este tipo de energía, a base de biogás, ha surgido como una alternativa prometedora en el campo de la sostenibilidad energética y ambiental. Se trata de un combustible gaseoso producido mediante el proceso de descomposición biológica de la materia orgánica, como residuos agrícolas, estiércol, desechos de alimentos y lodos de aguas residuales, en ausencia de oxígeno. Este proceso, conocido

como digestión anaeróbica, da como resultado la generación de biogás, compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono, así como pequeñas cantidades de otros gases (Castañeda, 2019).

A nivel mundial, la producción de biogás ha tenido resultados positivos en áreas agrícolas de bajos ingresos. En países como China e India, se han instalado aproximadamente de 6 a 8 millones de biorreactores domésticos para producir biogás, principalmente para cocinar o iluminar (González et al., 2018). En algunos países africanos, como Kenia y Uganda, se tiene como objetivo aliviar la pobreza energética, en base a la generación de energía a base de residuos sólidos orgánicos (Mart et al., 2014). La producción de biogás se ha incrementado en áreas donde se usa estiércol como una de las principales fuentes de sustrato para equipos de, incluyendo: reactores de pequeña y mediana capacidad con una producción promedio de biogás de $100\text{ m}^3/\text{día}$ y áreas de gran capacidad con producción de biogás aprox. $100\text{ m}^3/\text{día}$ está cerca de $500\text{ m}^3/\text{día}$ (Batzias, Sidiras, & Spyrou, 2005; Ferrer, 2009; Flores et al., 2008).

El uso de plantas bioambientales domésticas, biodigestores, en las zonas rurales de Colombia ha sido lento debido a la falta de apoyo institucional para este tipo de proyectos. Sin embargo, la aplicación de esta tecnología en la región andina y algunas demostraciones locales han contribuido al desarrollo de la industria en los últimos años. La producción a pequeña escala en áreas rurales no está bien documentada, principalmente porque la mayoría son el resultado de la iniciativa del usuario sin apoyo externo (Godar et al., 2019). En términos más generales, Colombia informó sobre experiencias con proyectos informados bajo los ODS; sin embargo, el auge de los cultivos de palma y la necesidad de tratar las aguas residuales líquidas de los productores de aceite incentivaron la implementación de proyectos en el sector (Acosta, M.E y Pasqualino, 2014).

El empleo de sustratos bovinos, porcinos y vegetales en la producción de biogás se ha convertido en una estrategia importante para promover la sostenibilidad ambiental y energética, así como para fomentar la producción de energía renovable en diversas regiones del mundo (Mejías et al., 2016). A medida que se adoptan prácticas más sostenibles en la gestión de residuos y en la generación de energía, se espera que el papel de estos sustratos en la producción de biogás siga siendo fundamental para lograr objetivos de desarrollo sostenible a nivel global. Por otro lado, estos sustratos desempeñan un papel crucial en la producción de biogás a través del proceso de digestión anaerobia, puesto que, tanto los residuos de origen animal como los vegetales contienen altas cantidades de materia orgánica, lo que los convierte en excelentes sustratos para la producción de biogás. Asimismo, contribuye a la gestión sostenible de residuos, evitando así posibles problemas ambientales asociados con la acumulación de desechos, por consiguiente, favorece a la reducción de las emisiones de metano a la atmósfera, ya que este gas de efecto invernadero se captura y se convierte en una fuente de energía útil (Arhoun, 2017).

Para ello es importante conocer el proceso de co-digestión anaerobia, el cual se basa en un tratamiento de residuos orgánicos en el que se mezclan diferentes tipos de sustratos y se someten a la acción de microorganismos para obtener biometano y un residuo llamado digestato (Pacheco, 2016). El proceso de co-digestión anaerobia se realiza generalmente en un reactor anaerobio, que puede ser un tanque o una fosa, donde se agregan los sustratos orgánicos, como residuos vegetales, estiércol, lodos de depuradoras, entre otros. Estos sustratos son ricos en materia orgánica y contienen compuestos como carbohidratos, grasas y proteínas, además hay que tener en cuenta que este tratamiento además de obtener biogás también es muy eficaz para el tratamiento de residuos que no están siendo

aprovechados, de igual forma a través de las etapas del mismo se llega a obtener un bioabono el cual es muy útil debido a la carga de nutrientes del mismo (Arhoun, 2017).

Posteriormente, en la segunda etapa, otra serie de bacterias llamadas acidogénicas convierten estos compuestos en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono. Finalmente, en la tercera etapa, bacterias metanogénicas transforman el ácido acético y otros compuestos en biogás, principalmente metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). El biogás producido durante la co-digestión anaerobia es un combustible que puede ser utilizado para producir calor, electricidad o ser inyectado a la red de gas. El digestato resultante del proceso es un residuo sólido o líquido que aún contiene nutrientes y puede ser utilizado como fertilizante o como sustrato para otros procesos de tratamiento (Benitez, L. 2018).

En resumen, el proceso de co-digestión anaerobia implica la mezcla y tratamiento de residuos orgánicos en un ambiente sin oxígeno, el cual contribuye a la estabilización del proceso de digestión anaerobia, puesto que equilibra la composición de los sustratos y compensa las deficiencias de nutrientes en ciertos residuos.

En base en lo mencionado anteriormente y evidenciando los problemas actuales de Colombia frente al suministro de energía y gas. La empresa PALMERAS SAN PABLO S.A.S. ubicada en el municipio de Puerto Lleras-Meta, la cual se caracteriza por tener cultivos de palma africana y grandes extensiones de ganadería, genera grandes cantidades de residuos orgánicos que no son aprovechados. Asimismo, esta empresa cuenta con rutas de difícil acceso, por lo cual es costoso los desplazamientos para la adquisición de GPL, teniendo en cuenta que esta posee altos consumos de energía eléctrica, un costo alto que es adquirido por esta organización. Es por esto por lo que el objetivo principal de este proyecto es evaluar la producción de biogás a partir de la co-digestión de estiércol bovino, porcino y residuos vegetales, generados en la empresa “PALMERAS SAN PABLO S.A.S”, vereda “El Santuario”, Puerto Lleras (Meta), a fin de obtener un aprovechamiento energético de los subproductos conseguidos de la actividad agropecuaria.

Este proyecto de investigación se desarrolló comenzando con una fase inicial que comprende la presentación del problema, la formulación de la pregunta de investigación, la justificación y los objetivos. Luego, se examinaron los marcos de referencia, los cuales incluyen aspectos teóricos, conceptuales, antecedentes, normativas, geográficos e institucionales. Después de esto, se detalla la metodología utilizada para lograr los objetivos establecidos, y finalmente se presentan los resultados, se realiza un análisis, se formulan conclusiones y se ofrecen recomendaciones.

1. Planteamiento del problema

En un contexto global marcado por la creciente preocupación sobre el cambio climático y la sostenibilidad ambiental, la dependencia histórica de las energías fósiles ha emergido como una problemática central que afecta a comunidades y naciones en todo el mundo. Este modelo energético, basado en la extracción y combustión de combustibles fósiles, no solo contribuye significativamente a las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también plantea desafíos relacionados con la seguridad energética y la volatilidad en los precios del petróleo.

Siguiendo con un contexto general de dependencia de energías no sostenibles, se evidencia un problema adicional a nivel más específico: el desaprovechamiento de residuos, especialmente aquellos de naturaleza orgánica. A pesar de la creciente conciencia sobre la importancia de la gestión de residuos, muchos lugares aún no han optimizado su potencial como fuentes de energía renovable. Los residuos orgánicos, que podrían convertirse en valiosos recursos para la generación de energía, a menudo terminan en vertederos, contribuyendo a la contaminación ambiental y perdiendo la oportunidad de ser aprovechados de manera sostenible.

Esta problemática específica se presenta como un punto de intervención estratégico, donde la transición hacia fuentes de energía alternativas se conecta directamente con la gestión eficiente de los residuos. La falta de infraestructuras y tecnologías adecuadas para aprovechar estos residuos, que podrían convertirse en biogás, biomasa o biocombustibles, representa un obstáculo tangible en el camino hacia sistemas energéticos más sostenibles y resilientes.

En este sentido, la contextualización de la problemática desde lo general a lo específico destaca la interconexión entre la dependencia de las energías fósiles a nivel global y el desaprovechamiento local de recursos potencialmente valiosos. Abordar estos desafíos no solo implica la búsqueda de alternativas energéticas, sino también la implementación de estrategias eficientes para gestionar y aprovechar de manera responsable los residuos, impulsando así un enfoque más holístico y sostenible hacia la matriz energética y la gestión ambiental.

La agricultura y la ganadería en pequeña y gran escala, así como la tala de bosques primarios y la deforestación, afectan al suministro de leña. La fuente de energía de la que depende más de un tercio de la población rural de bajos ingresos del mundo (Calvo et al., 2015).

Considerando que los usuarios rurales queman un promedio de 1000 kg de leña por año, teniendo en cuenta que el crecimiento de la población es mayor que el crecimiento de los árboles actualmente plantados, se presenta un aumento vertiginoso en los precios de los combustibles e impactos negativos en las empresas rurales donde tienen gran número de personal, un aumento en el tiempo y el esfuerzo necesarios para satisfacer las necesidades básicas de combustible en las zonas rurales y la aparición de paisajes sin cobertura forestal y la posibilidad de fenómenos irreversibles (Smith et al., 2004).

En Colombia recientemente se ha presenciado un aumento en los precios en los suministros de gas, alrededor de un 50%, sobre todo en las pipetas que almacenan este producto, debido a que la zona de estudio es rural y su acceso es limitado, por lo que, para la empresa y las comunidades vecinas se les dificulta la obtención de este, causado por barreras viales y económicas, lo cual genera un retroceso en las cocinas, puesto que, ya muchos hogares usaban el gas en la cocina y tuvieron que volver a la leña (Urrego, 2021).

Por otro lado, el costo creciente y la disponibilidad limitada de fuentes de energía mineral, junto con la dificultad de distribución en áreas rurales y el alto costo de los fertilizantes químicos, hace que el reciclaje de estiércol sea más eficiente y viable que producir y comprar combustible y fertilizantes químicos para este sistema agrícola.

La empresa PALMERAS SAN PABLO S.A.S se dedica principalmente al cultivo de palma africana. Además, cuenta con variedad de ganado bovino y porcino. No obstante, los subproductos generados en estas actividades no están siendo usufructuados, teniendo en cuenta, que estos pueden tener grandes beneficios para esta. Aunque el estiércol puede mejorar la calidad del suelo, y por consiguiente,

mejorar la producción del cultivo, su implementación tarda aproximadamente un año en degradarse y poder ofrecer todos sus nutrientes de manera asimilable. Asimismo, otro punto negativo es que al descomponerse en presencia del aire, la reacción que se presenta es exotérmica, a través de una fermentación, por lo que el calor producido eleva la temperatura a su alrededor y es capaz de inhibir la germinación de la semilla o frutos, provocando daño a las plántulas, lo cual es resultado de una relación incorrecta de tierra/estiércol; son gran fuente de amenaza, puesto que, generan la proliferación de vectores que afectan al ganado, el cultivo y a la salud propia de las personas, este problema radica en no realizar una disposición final del estiércol que se genera en grandes cantidades (Aarons et al., 2004; Vadas et al., 2011).

Hay que tener en cuenta, que los subproductos que esta organización genera es el estiércol bovino y porcino, como las fibras residuales del cultivo de palma de aceite. Si estos residuos no se tratan adecuadamente, se pueden plantear una serie de problemas ambientales y agrícolas significativos en el cultivo, además estos residuos pueden contaminar los suelos y las aguas subterráneas con nutrientes como nitrógeno y fósforo, así como con patógenos y bacterias nocivas (Carhuancho, 2012). Esto puede afectar la calidad del suelo y del agua, lo que a su vez puede tener consecuencias perjudiciales para la salud humana y la biodiversidad; la descomposición natural del estiércol y de los residuos vegetales en el campo puede generar emisiones significativas de metano, dióxido de carbono y óxido nitroso, dos potentes gases de efecto invernadero, emisiones que contribuyen al calentamiento global y al cambio climático. Por otra parte, cuando el estiércol bovino y porcino no se trata adecuadamente, se pierden valiosos nutrientes, como el nitrógeno, el fósforo y el potasio, que podrían haberse utilizado para mejorar la fertilidad del suelo y aumentar la productividad de los cultivos (Racines, 2018).

Con respecto a la producción de biogás a partir de la co-digestión anaerobia, hay que tener en cuenta que esta ofrece varios beneficios, pero también plantea ciertos desafíos y problemas que deben abordarse para garantizar un proceso eficiente y sostenible. Unos de estos problemas son que al utilizar una mezcla de diferentes sustratos, algunos de los cuales pueden tener características y composiciones heterogéneas, puede ser necesario realizar pretratamientos adicionales para homogeneizar la mezcla y garantizar condiciones óptimas de digestión. Esto puede aumentar los costos y la complejidad del proceso (Ramos, 2014). Asimismo, la co-digestión de múltiples sustratos puede dificultar el control y la regulación de la carga orgánica en el digestor, lo que podría afectar la estabilidad del proceso y la calidad del biogás producido (García y Gómez, 2016). El desequilibrio en la carga orgánica puede resultar en la acumulación de ácidos volátiles y la inhibición de la actividad microbiana. También, al introducir múltiples sustratos en el sistema de co-digestión, puede surgir competencia entre diferentes grupos de microorganismos por los nutrientes y condiciones favorables, lo que podría afectar la eficiencia global del proceso y la producción de biogás (Vergara, 2013). La gestión de un sistema de co-digestión puede ser más compleja en comparación con la digestión de un solo sustrato, lo que requiere un monitoreo y control más exhaustivo de los parámetros del proceso, como la temperatura, la acidez y la carga orgánica, para garantizar un funcionamiento óptimo y evitar posibles interrupciones (Lozano, 2015).

En este trabajo se estimó el potencial que tiene esta empresa para la producción de biogás a través de excretas de ganado vacuno, porcino y agrícolas, además del uso de los subproductos del biodigestor para la realización de abono verde, con el fin de mejorar la productividad del cultivo y contribuir a la minimización del uso de agroquímicos, así mismo, calcular la contribución a nivel socioeconómico de la población aledaña a esta empresa.

1.1 Pregunta de investigación

¿Cuál es la eficiencia de un sistema de co-digestión anaerobia basado en los subproductos sólidos orgánicos generados por la empresa PALMERAS SAN PABLO S.A.S en términos de producción de biometano?

2. Justificación

Este proyecto se encaminó a plantear una alternativa que conlleve el aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos generados en la empresa PALMERAS SAN PABLO S.A.S., los cuales no están teniendo una disposición final adecuada. Considerando que estos residuos tienen la capacidad de producir energía, con base en sus características fisicoquímicas, mediante digestión anaeróbica. Asimismo, se busca contribuir al desarrollo de alternativas condicentes a reducir impactos ambientales, así como la minimización del impacto en la salud de la comunidad aledaña y el ambiente. Los principales problemas ambientales de la actualidad están relacionados con los impactos negativos generados a través de actividades agrícolas y ganaderas (Titusunta, 2016). En consecuencia, los sistemas de energía renovable para la mitigación del cambio climático global y alternativas para aprovechar las reservas agotables, como la conversión de combustibles fósiles, para lograr carbón, petróleo y gas desarrollar mejor la idea, están incompletos. Teniendo en cuenta las necesidades requeridas y considerando el aumento de la población, el consumo de energía aumenta día a día, cada país necesita desarrollar su propia fuente de energía alternativa, considerada limpia, porque aumenta la seguridad energética y contribuye a reducir las emisiones de contaminantes atmosféricos como los gases de efecto invernadero (Durazno, 2018).

La energía basada en la transformación de la materia orgánica a través de procesos biotecnológicos anaerobios permite el aprovechamiento de residuos orgánicos sólidos, así como de sustratos básicos como el estiércol y biomasa restante, que normalmente se consideran residuos. Esta tecnología puede entender los residuos como una fuente útil de energía, incorporar materiales al ciclo productivo o utilizarlos para la producción de energía. Por lo tanto, las estrategias encaminadas a implementar sistemas de digestión anaerobia, conlleva a la reducción de la acumulación de residuos en el área donde está delimitada la empresa PALMERAS SAN PABLO S.A.S.

El uso de biodigestores para la producción de biogás con fines energéticos se ha convertido en una tecnología muy popular por sus beneficios económicos, sociales y ambientales, a la vez que se ha convertido en una alternativa rentable en el sector agropecuario por su alta disponibilidad de materias primas obtenidas a través de estas actividades. También se destacó el uso de biogás en quemadores para cocinar, reduciendo la deforestación y las enfermedades respiratorias al eliminar las emisiones de partículas por el uso de leña en sistemas de quema manual (Durazno, 2018).

En la actual investigación se llevó a cabo la co-digestión anaeróbica, puesto que está en contraposición a la digestión de un solo sustrato ofrece una serie de ventajas y beneficios que la hacen preferible en muchas situaciones. Como primera medida la co-digestión permite combinar diferentes tipos de sustratos con composiciones nutricionales diversas, lo que resulta en un equilibrio nutricional óptimo

para los microorganismos presentes en el digestor. Esto puede mejorar la eficiencia de la digestión y la producción de biogás en comparación con la digestión de un solo sustrato, que podría carecer de ciertos nutrientes esenciales (Arrieta, 2016). Además, contribuye al aprovechamiento de una amplia gama de sustratos orgánicos, como residuos agrícolas, residuos de alimentos, residuos de la industria alimentaria y residuos municipales, lo que maximiza la utilización de recursos y reduce la dependencia de un solo tipo de sustrato. Esto es especialmente beneficioso en términos de gestión de residuos y optimización de recursos. Asimismo, se tuvo en cuenta en este estudio, que, al combinar varios sustratos con diferentes tasas de degradación y contenido de nutrientes, la co-digestión puede aumentar la producción total de biogás en comparación con la digestión de un solo sustrato. Esto resulta en un mayor rendimiento energético y un uso más eficiente de los recursos disponibles (Arrieta, 2016). También, este proceso permite la mitigación de efectos inhibitorios de concentraciones elevadas de amoníaco y sulfuro. Además, estos sustratos favorecen el funcionamiento estable del proceso y generan un digestato óptimo como fertilizante, con mayor cantidad de nutrientes que, a su vez, obtiene un elevado rendimiento (Jingura y Matengaifa, 2009).

La incorporación de energías alternativas en territorios rurales, mediante la utilización de fuentes de biomasa disponibles, representa un hito significativo en la búsqueda de soluciones sostenibles para las comunidades fuera de los centros urbanos. La abundancia de recursos orgánicos en estas áreas ofrece una oportunidad única para desarrollar sistemas de energía renovable que no solo aborden las necesidades energéticas locales, sino que también promuevan la autosuficiencia y la resiliencia en estas comunidades. Considerando que la implementación de tecnologías de conversión sostenibles es esencial para maximizar el potencial de la biomasa. Ya sea a través de la producción de biogás mediante biodigestores, la combustión controlada para generación de calor y electricidad, o la obtención de biocombustibles, estas tecnologías no solo son eficientes, sino que también reducen la dependencia de fuentes no renovables y contribuyen a la mitigación de impactos ambientales. También, el impacto de estas iniciativas se extiende más allá de la esfera ambiental, llegando a impulsar el desarrollo económico y comunitario en áreas rurales. La generación de empleo local a través de proyectos de energía alternativa no solo fortalece la economía de la región, sino que también empodera a las comunidades al proporcionarles una fuente de energía propia y sostenible.

En este proyecto se analizan los conceptos ecológicos, sociales y económicos, desde una perspectiva de ingeniería ambiental, los que están estrechamente relacionados, la energía limpia no solo contribuye al desarrollo sostenible de acuerdo con los objetivos 7 y 13 de los ODS, sino que también contribuye al desarrollo económico local o nacional, como lo demuestran las granjas de paneles solares a gran escala, creando así puestos de trabajo, mejorando la vida de las personas y el ambiente. En otras palabras, la introducción de energías limpias y su correcto uso puede tener un efecto positivo, demostrando que es posible utilizar energías renovables e introducir tecnologías como la co-digestión anaeróbica para reducir el impacto negativo sobre el ambiente, como el apoyo para impulsar un progreso mayor y más ecológico hacia los ODS y las metas propuestas en el acercamiento a los procesos verdes.

Por lo que, se espera contribuir a la generación de una simbiosis empresarial, en donde se disminuirán costos en la empresa, cumpla con los criterios estipulados para mejorar la calidad y eficiencia de la empresa en su generalidad, como la mejora en la situación de las poblaciones rurales, las cuales se ven limitados a la consecución de gas y energía, también contribuyendo a la disminución de la disposición final de residuos, los cuales pueden no tener tratamiento y se vuelven foco de enfermedades y plagas

para la salud humana, como para la animal y de los cultivos, todo esto siendo enmendado por medio de energías verdes, consideradas limpias, como la que es estipulada en este proyecto.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Evaluar la producción de biometano a partir de la co-digestión anaerobia de subproductos sólidos orgánicos de origen agropecuario, generados en la empresa “PALMERAS SAN PABLO S.A.S”, vereda “El Santuario”, Puerto Lleras (Meta).

3.2 Objetivos específicos

- Establecer los subproductos generados en las diversas actividades de la Empresa PALMERAS SAN PABLOS S.A.S potencialmente aprovechables para un proceso de digestión anaerobia.
- Determinar el potencial energético teórico de biometano a partir de la estimación del volumen y composición de los residuos seleccionados.
- Valorar la producción de biometano y la generación de lodos resultantes, a partir de distintas proporciones de los residuos orgánicos establecidos, mediante la implementación de un sistema de co-digestión anaerobia a escala laboratorio.

4. Marco de referencia

En el presente capítulo se describen los marcos de referencia, incluyendo: marco teórico, marco conceptual, marco normativo, marco institucional y marco geográfico.

4.1 Marco teórico

Este trabajo buscó evaluar un proceso de co-digestión anaerobia como una disyuntiva del aprovechamiento de energía con base en los residuos orgánicos sólidos generados de las actividades agropecuarias de la empresa PALMERAS SAN PABLO S.A.S.

Inicialmente, la **digestión anaeróbica (DA)** se consideraba un proceso de descomposición de la materia orgánica. La DA es desarrollada por ciertas especies de microorganismos en un ambiente libre de oxígeno, que produce biogás, una mezcla de CH_4 y CO_2 con trazas de otros elementos, que contiene más metano y dióxido de carbono. Según la FAO, en el 2011, este proceso de descomposición convierte más del 90% de la energía libre en metano y el 10% restante en crecimiento bacteriano (S et al., 2016; López y Ruiz, 2014).

La DA se basa en un proceso de reducción que implica reacciones bioquímicas, en caso de falta de oxígeno. Este proceso involucra cuatro pasos para producir metano, los cuales son: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Los microorganismos involucrados en estas etapas consisten en macromoléculas, en los que se encuentran carbohidratos, proteínas y lípidos, además, hay que tener en cuenta su fisiología, necesidades nutricionales, crecimiento y sensibilidad ambiental; Del mismo modo toca ser minuciosos para que se mantenga un equilibrio entre el microorganismo formador de ácido y el formador de metano, esto lleva a la inestabilidad de las posibilidades digestivas biológicas, y de la producción baja de metano. Sin embargo, debido a su naturaleza puede haber inconvenientes relacionados con las mismas propiedades del sustrato que afectan la eficiencia del proceso. Por ende, se trató de considerar la mezcla de diferentes sustratos, lo cual crea soluciones de digestión que el monosustrato no acapara (FAO, 2011; Adekunle y Okolie, 2015; Arhoun, 2017).

Por ende tenemos que considerar directamente lo que concierne a la co-digestión **anaerobia**, entendida como la digestión de dos o más sustratos con características complementarias, lo que hace más efectivo la producción de biogás, por tener ventajas nutritivas y mejor equilibrio en la relación Carbono/Nitrógeno (Hagos et al., 2016; Mata-Alvarez et al., 2014; Shen et al., 2015; Xie et al., 2016, como se citó en Arhoun, 2017); este proceso permite la mitigación de efectos inhibitorios de concentraciones elevadas de amoníaco y sulfuro. Además, estos sustratos favorecen el funcionamiento estable del proceso y generan un digestato óptimo como fertilizante, con mayor cantidad de nutrientes que, a su vez, obtiene un elevado rendimiento del biogás con gran potencial de metano (Jingura & Matengaifa, 2009, como se citó en (López & Ruiz, 2014); no obstante, el biofertilizante depende tanto del tipo de tecnología empleada, como de las materias primas utilizadas en la co-digestión (C. Zhang et al., 2013; FAO, 2011).

La búsqueda de **fuentes de energía** más sostenibles y respetuosas con el ambiente ha llevado a un renovado interés en las **fuentes no convencionales de energía**. En este contexto, la **biomasa** proveniente de residuos agropecuarios se presenta como una alternativa prometedora que puede contribuir significativamente a la diversificación de la **matriz energética**, reduciendo la dependencia de los combustibles fósiles y mitigando los impactos ambientales asociados (C. Zhang et al., 2013).

La **biomasa**, en el contexto energético, se refiere a la materia orgánica de origen vegetal o animal que puede utilizarse como fuente de energía. En el caso de los **residuos agropecuarios**, estos constituyen una abundante fuente de biomasa que resulta de actividades agrícolas y ganaderas. La diversidad de residuos, como restos de cultivos, estiércol y desechos de cosechas, ofrece un amplio abanico de posibilidades para la generación de energía (C. Zhang et al., 2013).

La implementación de proyectos basados en fuentes no convencionales de energía a partir de la biomasa en residuos agropecuarios no solo tiene implicaciones ambientales, sino que también puede impulsar el desarrollo rural. **La gestión de residuos** a nivel local para la generación de energía no solo fomenta la autosuficiencia energética en comunidades agrícolas, sino que también puede generar oportunidades económicas a través de la creación de empleo en el sector de **energías renovables** (Arhoun, 2017).

En una revisión publicada por Mata-Alvarez et al., 2014 y citada en (Arhoun, 2017), los principales sustratos utilizados para la co-digestión son estiércol animal (54%), lodos de depuradora (22%) y fracción orgánica de residuos municipales. residuos (FORSU) (11%), y las propiedades del sustrato y su composición son factores esenciales para la co-digestión anaeróbica (Arhoun, 2017). El estiércol

animal es un sustrato eficiente para el crecimiento bacteriano debido a su alto contenido de materia orgánica y nutrientes, lo que puede mejorar el desempeño de la producción de biogás (Angeldaki y Ellegaard, 2003, citado en López y Ruiz, 2014). Sin embargo, el rendimiento de la producción de biogás se puede mejorar añadiendo otros sustratos como residuos sólidos orgánicos y restos de alimento, aguas residuales o lodos tratados y residuos agrícolas o agroindustriales (Arhoun, 2017).

Considerando que los residuos sólidos contribuyen significativamente en la generación de energías alternativas por medio de la codigestión anaerobia (S et al., 2016), es necesario contemplar el término de **Gestión Integral de Residuos Sólidos**. El Decreto 2981 (2013) la define como:

“El conjunto de actividades encaminadas a reducir la generación de residuos, a realizar el aprovechamiento teniendo en cuenta sus características, volumen, procedencia, costos, tratamiento con fines de valorización energética, posibilidades de aprovechamiento y comercialización. También incluye el tratamiento y disposición final de los residuos no aprovechables”.

Si bien existen muchas definiciones para entender GIRS, Terveyslaitos por su parte utiliza una definición breve y concisa que toma en cuenta algunas variables del Decreto 2981 de 2013. Por lo tanto, afirma que la gestión integral de residuos es un tratamiento que incluye la cobertura y planificación de todas las actividades de gestión de residuos desde su generación hasta su retirada final” (Mora y Berbeo, 2010). Actualmente se considera adecuada la combinación anaeróbica. La refrigeración como una opción que permite la gestión integral de los residuos sólidos aprovechables porque está vinculada al ciclo productivo, contribuyendo a la minimización de gases de efecto invernadero (Romero et al., 2020). Este último está plenamente vinculado al ODS número 13, que corresponde a la acción climática, que tiene como objetivo “Tomar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos” (ONU, 2018). Por lo tanto, el uso de fuentes de energía renovables se considera esencial para la restauración y gestión sostenible de los ecosistemas. absorber gases de efecto invernadero (ONU, 2018). De esta manera, estos ODS están alineados con las Directrices de **Desarrollo Sostenible**. Este concepto fue propuesto originalmente en el Informe Brundtland (1987) como "un concepto que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades" (Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo, 1987). Por tanto, intenta mantener un equilibrio entre los tres aspectos principales: económico, ecológico y social.

Hay que destacar la importancia de este proyecto en el campo del ambiente, que debe ser considerado como una teoría de **energía renovable** en la innovación y la aplicabilidad, el cual es un tema escaso en una era de globalización y consumismo.

De esta manera, es como se considera las energías alternativas como una forma de aprovechar factores abióticos (como el sol, viento, agua) y bióticos (biomasa) constituyentes del ambiente, con el fin, de producir energía a través de sus procesos termodinámicos y fisicoquímicos. Son una de las mejores formas de producir energía sin una afectación masiva al ambiente, los ecosistemas y la atmósfera. A su vez, son considerados como energías renovables debido a que tienen la capacidad de renovarse en continuo (Badii, Guillen & Abreu, 2016).

De las ventajas más sobresalientes que resultan en el uso de este tipo de energías, según Badii et al., (2016) son la eficiencia energética que entre otras trae a su vez:

- *Ahorra dinero:* Esto incluye acciones como el empleo de equipos de uso eficiente de energía, uso de focos ahorradores, tomar acciones o realizar hábitos en pro de ahorro de energía en el hogar y el trabajo.
- *Mejora la economía:* Esto ahorra billones de dólares por año, apoya a genera fuente de trabajo, promueve y estimula la innovación tanto a nivel personal y manufacturas.
- *Beneficia el ambiente:* El uso eficiente de energía apoya al ahorro de energía, asegura el ahorro de los recursos valiosos naturales y disminuye la contaminación.
- *Mejora la seguridad nacional:* La eficiencia energética apoya a la seguridad nacional y disminuye la dependencia en las fuentes y la tecnología extranjera. Esto incrementa la independencia energética, ahorra dinero para la defensa y provee mayor seguridad a las tropas militares.
- *Mejora la calidad de vida:* Aunque no se ve, pero se siente que la eficiencia energética mejora la calidad de vida. Los beneficios en este rubro incluyen el mayor confort, mayor productividad y mejor transporte, los cuales de forma colectiva mejoran el estándar de vida.

Por tanto, el uso de energías alternativas garantiza diversos beneficios en todos los ámbitos y dimensiones de la sociedad y la región. La calidad de vida, la eficiencia del gasto económico, la salud de los ecosistemas y su resiliencia mejorarán.

Teniendo en cuenta que los residuos de biomasa generados en el proceso de producción de energía deben ser eliminados adecuadamente, es necesario adoptar la tendencia de la **economía circular**. Esto garantiza el reciclaje y uso de materias primas a gran escala, lo que trae beneficios económicos y ambientales.

La **economía circular** se adopta, así como una forma de “*preservar sus componentes en procesos que puedan reintegrarse a la cadena de valor al final de su vida útil*” (Marcet, Marcet & Vergés, 2018). Por lo tanto, todo producto diseñado debe estar diseñado de tal manera que después del primer uso, se utilice el siguiente producto y continúe en una cadena de producción que minimice la generación de residuos.

Esta economía se basa en la premisa de cerrar ciclos de materiales y energía, y la biodigestión se alinea perfectamente con este principio al convertir los residuos orgánicos en recursos valiosos. La transformación de desechos, como estiércol animal y restos de cultivos, en biogás y nutrientes ricos a través de la biodigestión representa un ejemplo claro de cómo los procesos circulares pueden optimizar y reutilizar los recursos biológicos disponibles.

En regiones afectadas por la intensiva industria ganadera y palmicultora, donde la degradación del suelo y la pérdida de biodiversidad son preocupaciones prominentes, la implementación de la biodigestión emerge como una solución integral. Al reducir la contaminación asociada con los residuos orgánicos y al proporcionar nutrientes a través del digestato, este enfoque contribuye directamente a la regeneración de ecosistemas, promoviendo la recuperación de su salud y biodiversidad.

La **biodigestión** no se limita a ser simplemente un método de gestión de residuos; representa una oportunidad para rediseñar los sistemas agroalimentarios. Al integrar la **producción de energía** y nutrientes en ciclos cerrados, se fomenta la sostenibilidad agrícola. Esto implica un cambio hacia prácticas más eficientes, menos dependientes de insumos externos y más alineadas con los principios

de la economía circular, propiciando un modelo más equitativo y resiliente (Marcet, Marcet & Vergés, 2018).

El proyecto de **cierre de ciclos biológicos** mediante la biodigestión no solo cierra la brecha en la gestión de residuos, sino que también crea oportunidades para una economía sostenible. La conversión de residuos en biogás y nutrientes no solo contribuye a la producción de energía limpia, sino que también establece nuevas cadenas de valor y empleo en sectores emergentes de energías renovables y gestión de residuos, apoyando así la diversificación económica.

Por lo que, la conexión entre la economía circular y el proyecto de cierre de ciclos biológicos mediante la biodigestión es esencial para abordar desafíos contemporáneos. Desde la gestión de residuos hasta la regeneración de ecosistemas y el rediseño de **sistemas agroalimentarios**, esta **sinergia** no solo representa un enfoque integral y sostenible, sino también una oportunidad para forjar un futuro más equitativo y armonioso entre la actividad humana y la naturaleza (Marcet, Marcet & Vergés, 2018).

4.2 Marco conceptual

Para el desarrollo de este trabajo es importante tener claro una serie de conceptos que permiten la comprensión del proyecto; asimismo, se brindó una contextualización que abrió puertas a un mejor entendimiento de la temática principal, permitiendo una secuencia lógica en el proyecto.

Uno de los conceptos más importantes y reiterativos de esta investigación se centra en el término **codigestión anaerobia**, en donde se entiende que es el tratamiento conjunto de dos o más sustratos de diferente origen y composición, mejorando así el balance de nutrientes y características fisicoquímicas del sustrato, ayudando a una mejor estabilización del sistema y a una mayor producción de biogás (Durazno, 2018).

Los **residuos sólidos**, los cuales por medio de lo estipulado en el Decreto 2981 del 2013 se define como: “Cualquier objeto, material, sustancia o elemento principalmente sólido resultante del consumo o uso de un bien en actividades domésticas, industriales, comerciales, institucionales o de servicios, que el generador presenta para su recolección por parte de la persona prestadora del servicio público de aseo. Igualmente, se considera como residuo sólido, aquel proveniente del barrido y limpieza de áreas y vías públicas, corte de césped y poda de árboles. Los residuos sólidos que no tienen características de peligrosidad se dividen en aprovechables y no aprovechables”.

Dentro de estos residuos sólidos o desechos se encuentran los **residuos orgánicos**, definidos por Cormacarena (2010) como “aquellos que provienen de organismos vivos como plantas y animales, quienes contienen compuestos orgánicos producidos por la naturaleza y que se descomponen biológicamente por la acción de microorganismos o agentes fisico-químicos a condiciones normales”; de igual manera, la **biomasa residual** hace referencia a los productos secundarios, derivados de las transformaciones que se llevan a cabo con materia orgánica. Es relevante saber que la composición de la biomasa es básicamente carbono, oxígeno e hidrógeno, pues la fórmula química en general $C_n H_m$ son grandes y largas cadenas, las cuales constituyen reacciones exotérmicas generadoras de energía, la cual se representa en los componentes orgánicos de origen vegetal y animal (Durazno, 2018).

Los residuos sólidos orgánicos se pueden usar como materias primas para la producción de biogás es una mezcla de gas creada principalmente a partir de metano (50-70%) y dióxido Carbono (30-40%),

debido a la baja densidad se produce durante la degradación de la materia orgánica en la fase de metanogénica, pero también contiene diferentes impurezas. La composición del **biogás** depende del material digestivo y del trabajo del proceso; Además el **metano o biometano** es un gas que consiste en un átomo de carbón y cuatro átomos Hidrógeno. Es uno de los gases de efecto invernadero porque está presente en pequeñas cantidades en la atmósfera terrestre. Especialmente 1,8 ppm debido a actividades humanas y naturales. La cría de animales es una de las fuentes de emisiones de las actividades humanas. La ganadería tradicional y extensiva con un 50% y Cultivos de arroz hasta el 30%, también de fuentes naturales contribuyen a los gases de efecto invernadero, como las emisiones de los humedales y los océanos. (Center for Science Education, 2012; FAO, 2011; Navarro, 2017; Otálora, 2018).

Dado que el gas metano es un hidrocarburo, un componente importante del gas natural, se utiliza principalmente como combustible. Teniendo en cuenta que el metano producido en condiciones anaeróbicas es un combustible limpio (biocombustible) Pues este emite menos contaminantes atmosféricos, lo cual brinda beneficios ambientales y económicos, debido a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y al uso de fuentes de energía alternativas que sustituyen el uso de fuentes fósiles (Arhoun, 2017; Ecopetrol, 2014; Velásquez et al. 2018).

Para poder obtener la formación de biogás a partir de la digestión anaerobia, es necesaria para esto la implementación de un recipiente que permita el envasado de sustratos, para ello se utiliza un **biodigestor o reactor anaerobio**. Estos contenedores son herméticamente sellados con el fin de almacenar la materia orgánica en perfectas condiciones para que las bacterias puedan fermentar durante la operación. En ellos ocurre la co-digestión anaerobia, en donde el material orgánico se transforma en biogás y biofertilizante, por lo que el contenedor debe tener un sistema óptimo para el crecimiento microbiano y así mismo capturar dicho gas evitando que este se mezcle con el aire exterior (Aponte & Vélez, 2019).

Como ya se mencionó, la digestión anaeróbica es un proceso biológico que puede usarse para producir biogás a partir de materiales orgánicos. Este material orgánico se transforma por la acción de varios grupos de microorganismos, que convierten el material orgánico en compuestos más pequeños y simples y luego en ácidos grasos volátiles, que sirven como principales intermediarios del proceso. Estos ácidos son consumidos por un grupo de microorganismos metanogénicos y posteriormente convertidos en metano y dióxido de carbono (Adekunle y Okolie, 2015).

El proceso anterior se divide en cuatro etapas: hidrólisis, producción de ácido, acetogénesis y metanogénesis. Estos ocurren simultáneamente en un reactor anaeróbico (Adekunle y Okolie, 2015).

El primer paso de la digestión anaerobia es la **hidrólisis**. En esta etapa, los lípidos, polisacáridos, proteínas, grasas y ácidos nucleicos (los materiales orgánicos insolubles y compuestos de mayor masa molecular), por acción de las enzimas extracelulares, producidas por bacterias fermentativas, se transforman en materiales orgánicos solubles, los cuales son la principal fuente para obtener energía y carbono celular (Adekunle & Okolie, 2015).

En la segunda etapa, las bacterias acidogénicas, encargadas del proceso de **acidogénesis** convierten los monosacáridos, aminoácidos y grasos acidogénicos en ácidos orgánicos y alcoholes. Esta conversión requiere que el producto del primer paso, el monómero, sea absorbido por bacterias anaeróbicas facultativas y obligadas y descompuesto en proteínas, aminoácidos, péptidos y ácidos

orgánicos de cadena corta para su uso. microorganismos aeróbicos como fuente de energía (Adekunle & Okolie, 2015).

Los productos de la fase acidogénesis, cumplen la función de sustrato de los microorganismos activos para esta tercera fase, **acetogénesis**. El proceso de esta etapa se basa en la oxidación anaerobia. Por consiguiente, arqueobacterias metanogénicas convierten los productos de la fase ácida en metano y lo que no se puede convertir directamente se convierte en sustratos metanogénicos, ácidos grasos volátiles y alcoholes (AGV). Estos productos pueden oxidarse a acetato e hidrógeno siempre que tengan cadenas de carbono de múltiples unidades (Adekunle y Okolie, 2015). En esta etapa es importante que coexistan los microorganismos metanogénicos y los microorganismos responsables de la oxidación anaeróbica, ya que los protones necesitan actuar como aceptores, ya que los microorganismos necesitan mantener bajo el contenido de hidrógeno.

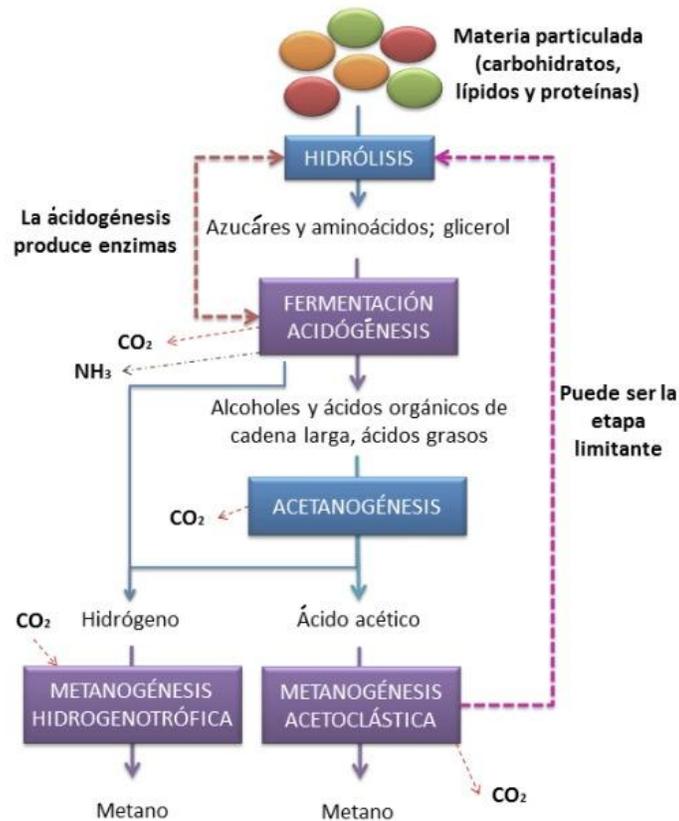
La cantidad final de electrones conduce a la producción de H_2 , CO_2 , formiato, metanol y metalmina sulfuro de dimetilo (Ziemiński y Frąç, 2012). La acetogénesis es la fase que representa la eficiencia de la producción de biogás, ya que aproximadamente el 70% del metano se produce durante la reducción del acetato. Por tanto, el acetato es un producto intermedio importante del proceso de digestión anaeróbica (Ziemiński y Frąç, 2012). Durante la etapa de producción de ácido acético, aproximadamente el 25% del producto forma acetato; 11% en Hidrógeno producido en procesos de descomposición de residuos (Ziemiński y Frąç, 2012).

En el paso final, la **metanogénesis**, el metano es producido por arqueas metanogénicas. Estos microorganismos utilizan como sustratos los productos obtenidos en los tres pasos anteriores, a saber, ácido acético, H_2 , CO_2 , ácido fórmico, metanol, metilamina o sulfuro de dimetilo (Merlin, Gopinath, Divya, 2014). Este proceso se lleva a cabo en estrictas condiciones anaeróbicas, consumiendo H_2 y creando condiciones favorables para el desarrollo de bacterias ácidas. Durante la etapa de acidificación, las bacterias ácidas producen ácidos orgánicos de cadena corta, lo que lleva a la producción. Si hay muy poco H_2 en la fase acetogénica, se produce metano. Hay que tener en cuenta que la conversión se ve afectada ya que el gas puede tener un alto contenido de CO_2 , lo que resulta en una baja producción de metano e imposibilita la producción de biogás (Merlin, Gopinath, Divya, 2014). Por otro lado, es importante destacar que sólo el 30% del metano producido en este proceso proviene del acetato. El acetato es el resultado de la descarboxilación de moléculas por bacterias metanogénicas acetoclásticas, de las que se obtiene CO_2 y metano del grupo metilo del ácido acético (Arhoun, 2017)

Para obtener una comprensión más completa del proceso llevado a cabo en este proyecto, es esencial observar todas las etapas de la digestión anaeróbica. Estas etapas se encuentran detalladas en la Figura 1, proporcionando una representación visual de cómo se desarrolla cada fase del proceso.

La Figura 1 no solo es una herramienta visual esclarecedora, sino que también sirve como una guía para entender en detalle cómo se produce la descomposición de la materia orgánica en ausencia de oxígeno. Cada etapa de la digestión anaerobia tiene un papel específico en la conversión de los residuos orgánicos en biogás y subproductos aprovechables. Desde la fase inicial de hidrólisis hasta la producción final de biogás se logra apreciar en la figura 1.

Figura 1. Etapas de la digestión anaeróbica.



Fuente: (Castro Liliana, 2016).

4.3 Marco normativo

Tabla 1. Marco normativo.

Normativa	Decretado por	Fecha	Dicta
Ley 99 de 1993	Congreso de la República de Colombia	Diciembre 22 de 1993	“Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones”.
Ley 142 de 1994	Congreso de la República de Colombia	Julio 11 de 1994	“Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones”.
Ley 629 de 2000	Congreso de la República de Colombia	Diciembre 27 de 2000	“Por medio de la cual se aprueba el Protocolo de Kyoto de la convención “Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático”, con el fin de reducir las emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI).
Ley 697 de 2001	Congreso de la República de Colombia	Octubre 03 de 2001	“Por medio de la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, también se promueve la utilización de energías alternativas y se dictan otras disposiciones.
Política Nacional de Producción y Consumo Sostenible	Ministerio de Ambiente	2010	Se actualiza e integra la Política Nacional de Producción más Limpia y el Plan Nacional de Mercados Verdes como estrategias del Estado Colombiano para promover el mejoramiento ambiental y la transformación productiva a la competitividad empresarial.

Decreto 2981 de 2013	Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio	Diciembre 20 de 2013	“Por el cual se reglamenta la prestación del servicio público de aseo”
Ley 1715 de 2014	Congreso de la República de Colombia	Mayo 13 de 2014	“Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional”. Esta norma se hace con el fin de incentivar la producción, autogeneración, uso y gestión eficiente de la energía renovable.
Decreto 1073 de 2015	Presidente de la República de Colombia	Mayo 26 de 2015	“Se reglamenta el uso racional y eficiente de la energía y se crea la Comisión Intersectorial para el Uso Racional y Eficiente de la Energía y Fuentes No Convencionales de Energía, CIURE”.
Decreto 1076 de 2015	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Mayo 26 de 2015	“Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible”.
Decreto 298 de 2016	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Febrero 24 de 2016	“Por medio del cual se establece el funcionamiento del Sistema Nacional de Cambio Climático enfocado en el aprovechamiento de los sitios de disposición final de residuos sólidos para la generación de biogás”.
Resolución 240 de 2016	Comisión de regulación de energía y gas	Febrero 3 de 2017	“Por la cual se adoptan las normas aplicables al servicio público domiciliario de gas combustible con biogás y biometano”.
Ley 1931 de 2018	Congreso de la República de Colombia	Julio 27 de 2018	“Por la cual se establecen directrices para la gestión del cambio climático y la mitigación de gases efecto invernadero, con el objetivo de reducir la vulnerabilidad de la población y de los ecosistemas del país frente a los efectos de este, así como promover la transición hacia una economía competitiva, sustentable y un desarrollo bajo en carbono.”
RESOLUCIÓN No. 00150	ICA (Instituto colombiano agropecuario)	Enero 21 de 2003	Por la cual se adopta el Reglamento Técnico de Fertilizantes y Acondicionadores de Suelos para Colombia.
Ley 2099 de 2021	Congreso de la República	Julio 10 de 2021	“Por medio de la cual se dictan disposiciones para la transición energética, la dinamización del mercado energético, la reactivación económica del país y se dictan otras disposiciones”.

Fuente: (Autores, 2023).

En Colombia, la implementación de biodigestores se ha promovido como una medida para la gestión sostenible de residuos orgánicos y la producción de biogás, que puede utilizarse como fuente de energía renovable. La regulación ambiental en Colombia está influenciada por leyes federales y regulaciones a nivel nacional, así como por regulaciones específicas de las autoridades ambientales locales.

Por otra parte, se puede observar que Colombia puede adoptar normas técnicas específicas para biodigestores que rigen su diseño, construcción y operación. Estas normas pueden ser establecidas por entidades como el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC).

Hay que tener en cuenta que las autoridades ambientales regionales y locales pueden tener regulaciones específicas relacionadas con la implementación de biodigestores en su área de jurisdicción. Estas regulaciones pueden variar según la ubicación geográfica. Asimismo, es probable que se requieran permisos y licencias ambientales para la construcción y operación de biodigestores en Colombia. Estos permisos suelen ser otorgados por las autoridades ambientales competentes.

En contraparte, el escaso avance normativo en el desarrollo de energías alternativas basadas en biomasa en este país puede atribuirse a diversas razones que reflejan desafíos y limitaciones específicos. Algunos son la falta de incentivos financieros, como subsidios o créditos fiscales, puede desmotivar a las empresas y comunidades a invertir en proyectos basados en biomasa. La ausencia de políticas que fomenten activamente el desarrollo de estas tecnologías limita su atractivo económico, por otra parte, se encuentra la ausencia de un marco regulatorio claro y específico para las energías basadas en biomasa puede generar incertidumbre entre los inversionistas y desarrolladores. La ambigüedad en las regulaciones puede hacer que sea difícil planificar y ejecutar proyectos de manera efectiva. Todo esto es debido a que la infraestructura está fuertemente orientada hacia fuentes de energía tradicionales, como los combustibles fósiles, puede haber una resistencia al cambio debido a la inversión previa en tecnologías y sistemas existentes. Industrias tradicionales, como la del petróleo, pueden oponerse a las nuevas regulaciones que fomentan tecnologías de biomasa, ya que podrían verlas como una amenaza a sus intereses comerciales.

4.4 Marco institucional

Tabla 2. Marco institucional.

Institución	Descripción
Participación directa	
Universidad El Bosque	Institución que fomenta la investigación y el aprendizaje, contando que, en ciertos casos, financia para el desarrollo de estas actividades. Formó durante el transcurso de la carrera para lograr el desarrollo del propósito de esta investigación.
Empresa PALMERAS SAN PABLO S.A.S	Empresa dedicada al cultivo de palma de aceite y ganadería, en la cual se va a realizar el proyecto, en donde hay espacio, disposición e interés para llevar a cabo la construcción de esta iniciativa.
Participación indirecta	
IGAC	Institución que facilita información para la realización de toda la parte de clasificación geográfica del espacio a trabajar.
Alcaldía Municipal de Puerto Lleras-Meta	La unidad territorial se utiliza para delimitar áreas y bases de levantamiento de información específicas para su implementación en punto de interés en el desarrollo del proyecto.
Junta de acción comunal y habitantes de la vereda El Santuario	Personas que viven en el campo de la investigación, con los que se determina cierta la información básica sobre el problema a manejar, la cual beneficia para la continuidad de este proyecto. Estas también se van a beneficiar de este mismo.
Fedepalma	Federación de una agroindustria palmera competitiva y sostenible, congregando, orientando, representando y defendiendo a los palmicultores colombianos en sus intereses sectoriales, para contribuir al bienestar de sus comunidades y al progreso del país.

Porkolombia	La Asociación Porkolombia es el gremio que representa a los productores de carne de cerdo del país. La cual impulsa y acompaña en el proceso de tecnificación en todos los eslabones de la cadena cárnica porcina y se fomenta el consumo de la carne de cerdo.
Fedegán	Gremio cúpula de la ganadería colombiana, FEDEGÁN agrupa, en calidad de afiliadas, a las organizaciones gremiales ganaderas regionales y locales, como también a otro tipo de entidades vinculadas a la actividad ganadera nacional.
La CREG	Entidades encargadas de determinar e incidir en la exenciones tributarias y fiscales en organizaciones que produzcan y consuman energía a partir de fuentes no convencionales.
ANLA	
La UPMe	

Fuente: (Autores, 2023).

4.5 Marco geográfico

4.5.1 Características generales

La empresa PALMERAS SAN PABLO S.A.S se dedica al cultivo de Palma Africana, fue el lugar de estudio seleccionado para extraer la muestra de suelo a ser analizada en el presente documento. Se encuentra ubicada en el Municipio de Puerto Lleras, al sur occidente del departamento del Meta (Fig.1), a 146 Kilómetros de Villavicencio. La cabecera urbana está localizada a 230 m.s.n.m., a 33 km de distancia desde la plantación, en la margen izquierda del río Ariari en las siguientes coordenadas geográficas: 3° 17' de latitud norte y 73°23' de longitud oeste, siendo el municipio parte de la subregión del Bajo Ariari (López Landaeta & Romero Umaña, 2013).

Figura 2. Puerto Lleras-Meta.

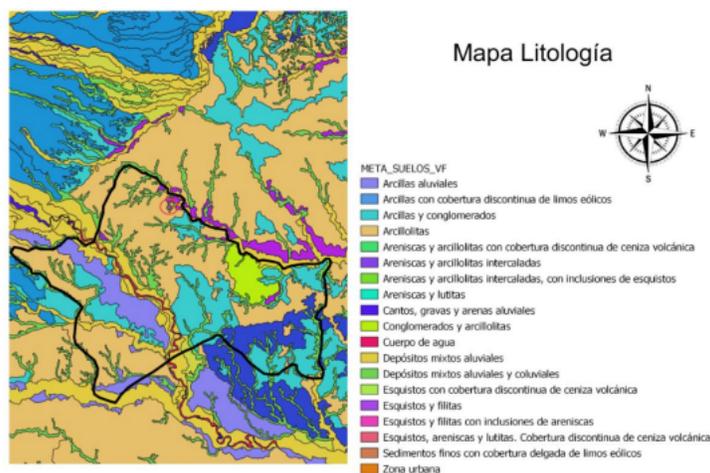


Fuente: (DANE, 2012).

4.5.2 Material parental específico

Según el siguiente mapa (Fig.3), en la Finca San Pablo que se encuentra enmarcada en el círculo rojo, predomina el material parental de Depósitos Mixtos Aluviales y Arcillolitas. Un depósito aluvial es una masa de sedimentos detríticos que ha sido transportada y sedimentada por un flujo o aluvión, es decir, por depósitos de arena, sedimento, grava y barro mojado por los ríos y arroyos; siendo los depósitos aluviales como también se les conoce de origen muy reciente (geológicamente hablando, menos de unos cuantos millones de años). Mientras que, en cuanto a las Arcillolitas, estas son las lutitas con alto contenido de arcilla, lo cual las hace muy susceptibles a deslizamientos (Grupo Energía Bogotá, 2014).

Figura 3. Mapa de litología.

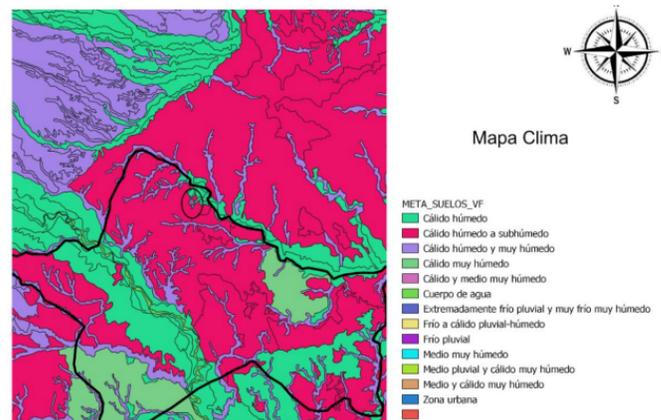


Elaboración Propia. Fuente de Información: (IGAC, 2000).

4.5.3 Clima, temperatura y precipitación específica

De acuerdo con la Figura 4, el clima en la Finca San Pablo (delimitada por el óvalo negro) en una porción es cálido húmedo, mientras que en la sección restante corresponde a cálido húmedo a subhúmedo; característicos por presentar una temperatura y precipitaciones anuales de 26°C-28°C y 2500-3000mm respectivamente (IDEAM, 2010).

Figura 4. Mapa de clima.



Elaboración Propia. Fuente de Información: (IGAC, 2000).

4.5.4 Relieve en el área de estudio

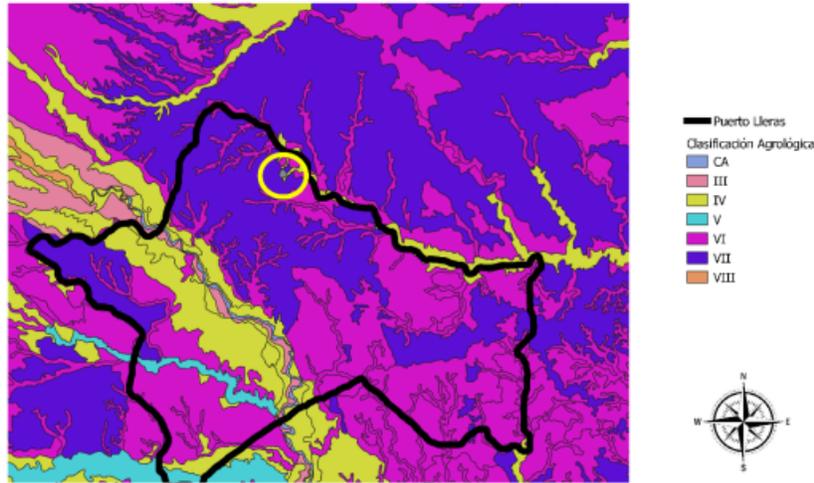
En el lugar de estudio predominan filas – vigas – crestas-crestones (MPFv) que corresponde a relieve inclinado y escarpado con pendientes de 25-75%, laderas medias y largas, rectilíneas y ligeramente convexas, así mismo, presenta escarpes con pendientes mayores de 75%; cabe destacar que se ven afectados por deslizamientos puntuales, escurrimiento difuso y erosión laminar ligera (Consortio Ingedisa Dessau Antea San Fernando, 2017). También se encuentran las lomas que exhiben cimas amplias con pendientes fuertemente onduladas (12-25%) y laderas medianas y largas con pendientes ligeramente escarpadas (25-50%) (MINHACIENDA et al., 2017).

4.5.5 Clasificación Agrológica de los suelos

Conforme a la Figura 5. Clasificación Agrológica del Suelo, la Finca San Pablo enmarcada por el óvalo amarillo, tiene como capacidad de uso y manejo de las Tierras las clases IV y VII. La clase IV corresponde a tierras arables con restricciones severas que condicionan su uso a cultivos específicos y a ganadería o agroforestería que exigen prácticas cuidadosas de manejo, es decir su uso se limita a producción agrícola, agropecuario y restringido. Mientras que, la clase VII es más exigente en cuanto a limitar el no arado, establecimiento excesivas restricciones que condicionan su uso a bosques protectores, agroforestería, cobertura vegetal permanente, excluyendo del todo la ganadería enfocándose solo en un manejo estricto ya sea forestal productor o protector agroforestal.

Figura 5. *Clasificación agrológica del suelo.*

Clasificación Agrológica del Suelo, Finca San Pablo



Elaboración Propia. Fuente de Información: (IGAC, 2000).

4.5.6 Aire

El municipio de Puerto Lleras-Meta no presenta problemas de contaminación atmosférica, supuesto a que hay baja intervención industrial; sin embargo, en algunas viviendas, especialmente en la zona rural, el medio más utilizado para la cocción de los alimentos es haciendo uso de estufas de leña y carbón, lo que genera impactos ambientales como las emisiones de dióxido de carbono y la deforestación. Esto también es debido a los altos precios en las pipetas de gas y a las grandes distancias entre las cabeceras urbanas y las zonas rurales (Alcaldía municipal de Puerto Lleras, 2020).

4.5.7 Vereda “El Santuario”

La vereda “El Santuario” se encuentra situada a 15 minutos de la zona urbana de Puerto Lleras, la cual tiene actividades económicas predominante la ganadería y los cultivos, especialmente de maderables (Teca), palma africana y pasto de corte, en donde la actividad más predominante es la ganadería. Esta vereda es de tipo Rural y corresponde a la zona ubicada entre Municipio San Martín al norte y Municipio Puerto Rico al sur, Municipio Mapiripán al oriente y Río Ariari al occidente.

En esta zona se presenta degradación en sus suelos causados por procesos erosivos por la acción pluvial y antrópica que causan pérdida de materia orgánica, alta compactación y desertificación de suelos. En la actualidad no hay existencia de programas de recuperación de suelos ni de reforestación, por lo que, también se considera la disminución progresiva del recurso hídrico y la pérdida total de fuentes hídricas debido al mal uso del suelo y la proliferación de especies vegetales foráneas.

Hay que tener en cuenta que en esta zona veredal la mayoría de los hogares, sin tener en cuenta el precio de la pipeta de gas, cocinan con carbón o leña, presentando problemáticas en la salud de los habitantes debido a la exposición de los gases producto de la combustión de estos.

Figura 6. Vereda el santuario Puerto Lleras Meta.



Fuente: Código Postal Vereda El Santuario, Puerto Lleras. (s. f.).

4.5.8 Finca “San Pablo”

La empresa PALMERAS SAN PABLO S.A.S, está comprendida en la Finca “San Pablo”, la cual se encuentra ubicada en la vereda El Santuario (Figura 7), esta posee una extensión aproximada de seiscientas hectáreas; está habitada por personal de planta y de contratación, que por lo general son 15 personas, donde su actividad económica principal es el trabajo en la palma de aceite y ganadería; actualmente, cuentan con doscientas cabezas de ganado bovino de raza Brahman gris, Angus y Brangus. Como se mencionó anteriormente, esta finca y sus alrededores, no cuentan con red de gas natural, por lo que deben hacer uso de pipetas de gas para abastecer cada una de sus necesidades. Tampoco cuentan con una recolección eficiente de residuos sólidos puesto que, el vehículo recolector del municipio de Puerto Lleras no cubre este sector rural, por lo que acuden a disponerlos de forma inadecuada como la quema de estos (Alcaldía municipal de Puerto Lleras, 2020).

Figura 7. PALMERAS SAN PABLO S.A.S



Fuente: Elaboración propia. (Google Earth, 2022).

4.6 Estado del arte

En esta sección se presentan los artículos nacionales e internacionales, encontrados en las bases de datos ScienceDirect y Scopus, y en buscadores especializados como Google Académico; los cuales tienen relación con el objeto de investigación de este trabajo.

En el artículo “Gas Natural Renovable para el desarrollo rural Potencial para Colombia” (2018), se realiza la recopilación de los diferentes datos históricos respecto a los procesos de digestión que son el resultado de la degradación de aguas residuales (domésticas e industriales), estiércol y residuos. Menciona que Brasil y Colombia fueron líderes mundiales en el tema de residuos de palma, en los años 1980 y 1990. De forma general, menciona aspectos referentes a la agroindustria y los subproductos dentro de la digestión que traen consigo ventajas agrícolas, energéticas y de sostenibilidad. Así es, como se pueden relacionar los casos de estudio aplicados a la palma y a la caña; de esta forma muestran el potencial de sus productos derivados para la producción de biogás (Conil, 2018).

En la tesis titulada “Digestión y co-digestión anaerobia de residuos agrícolas, ganaderos y lodos de depuradora” (2017), se implementó un biodigestor experimental, en el que se utilizaron residuos de fruta y vegetales, lodos mixtos municipales y estiércol de cerdo como sustratos y lodo digerido como inóculo procedente de una planta de aguas residuales. Se realizó una comparación entre el sistema continuo y discontinuo, en el que resaltó la importancia de este primero, ya que permitió tratar mayor cantidad de residuos alimenticios ($9\text{g/L}\cdot\text{día}$) que el sistema discontinuo ($4,5\text{g/L}\cdot\text{día}$); igualmente por medio de este, se produjo más cantidad de metano y redujo la producción acelerada de ácidos grasos (Arhoun, 2017).

En el artículo “Nutrient contributions and biogas potential of co-digestion of feedstocks and dairy manure” (2017), se presentó el proceso de co-digestión mediante estiércol de vaca y otros elementos como sangre, pescado, pulpa de papel, bebidas caducadas y grasas. De lo anterior, se evidencia que el estiércol generaba un aporte más significativo en la producción de metano dentro del proceso de co-digestión. Se identifica que las cenizas producto de la quema de los sobrantes, permitía saber el balance

de masa de sólidos totales derivados del proceso de compostaje. De esta forma, fue posible medir el rendimiento de los sólidos totales y volátiles en la producción de biogás (Ma, Neibergs, et al., 2017).

En la tesis titulada “Evaluación de herramientas para el análisis experimental de biocombustibles en laboratorios de la universidad cooperativa de Colombia” (2018). En esta investigación se evaluaron herramientas para el análisis de biocombustibles, se llevó a cabo el montaje experimental de ensayos de biodegradabilidad anaeróbica de dos tipos de biorresiduos. El primero, una mezcla homogeneizada de estiércoles, rumen y otros desechos producto del proceso de evisceración de ganado porcino y bovino. El segundo, residuos sólidos municipales (RSM) (Hernández, 2018).

En el artículo “Thermophilic anaerobic co-digestion of oil palm empty fruit bunches with palm oil mill effluent for efficient biogas production ” se investigó el efecto de los métodos de pretratamiento para mejorar la biodegradabilidad y la producción de biogás de los racimos vacíos de palma aceitera (EFB) y su co-digestión con el efluente de la almazara de palma (POME). La co-digestión de EFB con POME mejoró la biodegradabilidad microbiana y dio lugar a una producción de metano entre un 25 y un 32% mayor en proporciones de mezcla de 0,4:1, 0,8:1 y 2, 3:1 en base SV que la digestión de EFB sola. La producción de metano fue de 276-340 mL CH_4 /g SV añadido para la co-digestión de EFB con POME en proporciones de mezcla de 0,4:1-2,3:1, mientras que se observó una mejora menor en proporciones de mezcla de 6,8:1 y 11:1 (175-197 mL CH_4 /g VS añadido). La mejor mejora se obtuvo a partir de la co-digestión de EFB tratada mediante remojo previo con NaOH y tratamiento hidrotérmico con POME, que dio lugar a una mejora del 98% en la producción de metano en comparación con la co-digestión de EFB sin tratar (Sompong et al., 2012).

En el trabajo con título “Evaluación de la producción de metano en la digestión anaerobia de la especie invasora Retamo espinoso y el residuo agrícola rastrojo de maíz mediante el uso de un biorreactor Batch” tuvo como fin la evaluación de la producción de metano a partir de la digestión anaerobia de la especie invasora retamo espinoso y el residuo agrícola rastrojo de maíz mediante el uso de un biorreactor Batch. Durante el desarrollo de la fase experimental se realizó el ajuste de algunos parámetros de funcionamiento del biorreactor, posteriormente se caracterizó el sustrato e inóculo en términos de análisis de sólidos, NT, N orgánico, humedad, pH, DQO, AGV y alcalinidad. El proceso de digestión anaerobia tuvo un tiempo de duración de 19 días para cada ensayo realizado (Inóculo, rastrojo de maíz y retamo espinoso), la temperatura fue de aproximadamente 35°C, y el pH se mantuvo en un rango de 6,7-7,8, el mayor porcentaje de metano se obtuvo en la biodegradación del retamo espinoso, siendo este de 87,10%, con concentraciones de 2688,7 mg/L y 3086,91 mg/L de biogás y metano respectivamente (Simbaqueva y Urrego, 2019).

En la tesis con título “The role of small-scale biodigesters in the energy, health, and climate change baseline in Mexico” se abordan aspectos de los retos técnicos, económicos y sociales para la implementación de sistemas de biodigestión a pequeña escala en pequeñas granjas porcinas en México. Describo el desarrollo y las pruebas de un diseño mejorado de biodigestor destinado a subsanar las deficiencias de los sistemas tradicionales de bajo coste. El diseño mejorado del biodigestor tiene ventajas técnicas sobre el biodigestor de bolsa tradicional, incluyendo durabilidad, reparabilidad y facilidad de instalación. Se calcula que el coste del ciclo de vida a lo largo de 15 años es un 40% inferior al del sistema tradicional de bajo coste.

Utilizando estos valores he estimado una relación coste/beneficio para la instalación de biodigestores, expresada en términos de tasas de amortización (años). Un biodigestor de 10 metros para una pequeña explotación tiene una tasa de amortización de 2,8 años basada únicamente en los servicios energéticos

(desplazamiento de la leña); una amortización de 1,5 años incluyendo los servicios energéticos y la reducción de emisiones; y una amortización de 0,9 años si se tienen en cuenta los servicios energéticos, la reducción de emisiones y los riesgos sanitarios evitados.

En el trabajo “Anaerobic co-digestion of organic wastes” se revisan los resultados más interesantes obtenidos a través de dichos estudios, centrándose principalmente en los tres aspectos siguientes: (1) el análisis de los sustratos orgánicos típicamente codigeridos para explotar sus características complementarias; (2) la necesidad de pretratar los sustratos antes de su digestión para cambiar sus características físicas y/o químicas; (3) la utilidad de los modelos matemáticos que simulan el proceso de cogestión anaerobia. En particular, estos estudios han demostrado que la combinación de diferentes residuos orgánicos da lugar a un sustrato más equilibrado y variado en términos de nutrientes, los pretratamientos hacen que los sólidos orgánicos sean más accesibles y degradables para los microorganismos, mientras que los modelos matemáticos son extremadamente útiles para predecir el rendimiento del proceso de co-digestión y, por lo tanto, se pueden utilizar con éxito para elegir los mejores sustratos para mezclar, así como los pretratamientos más adecuados que se deben aplicar. En este se cita que la sustitución del 25% del estiércol de cerdo alimentado a una planta de co-digestión por la fracción sólida separada del mismo estiércol de cerdo dio lugar a un aumento de la producción de biogás de 20 a 25 $Nm^3 CH_4 m^{-3}$ - sustrato (Esposito et al., 2012).

Además, en Perú los proyectos de biodigestores llevados a cabo hasta el 2014, informaron la implementación de aproximadamente 20 biodigestores familiares en zonas rurales de la región de Cusco y Cajamarca. Los biodigestores implementados produjeron gas capaz de rendir de 3 a 4 horas diarias para cocinar; de esta manera se beneficiaron económicamente muchas comunidades campesinas, asimismo, se obtuvieron rendimientos favorecen la digestión metanogénica, con un porcentaje de metano del 63,91 % y 35,77% de dióxido de carbono (Caceres 2021).

Finalmente, se tomó como referencia la tesis titulada “Estudio de factibilidad para el diseño de un biodigestor de aprovechamiento sostenible de excretas de bovino en la hacienda Los Naranjos, Tambo - Cauca” (2019), en la que se diseñaron cuatro tipos de digestores, cada uno de diferente modelo (chino, modelo indiano, biodigestor tubular y digestor batch). El que presentó mejor desempeño fue el biodigestor tubular, en el que se utilizó el estiércol bovino como sustrato, arrojando una producción de biogás fue de 0,8 - 1,0 m^3 (Díaz y Salazar, 2019).

5. Metodología

5.1 Diseño metodológico

El actual proyecto tiene como objetivo focal “Evaluar la producción de biogás a partir de la co-digestión de estiércol bovino, porcino y residuos vegetales, generados en la empresa PALMERAS SAN PABLO S.A.S a fin de obtener un aprovechamiento energético de los subproductos conseguidos de la actividad agropecuaria”. Este trabajo se realiza, por medio de un enfoque mixto, es decir, que con este no se va a reemplazar ni la investigación cualitativa ni cuantitativa, si no que se van a usar las

fortalezas de esos enfoques; este enfoque a utilizar constituye la recolección, el análisis tanto de datos cualitativos como de datos cuantitativos, la integración de estos seguido de su discusión en conjunto, con el propósito fin de poseer resultados extensos y profundos, por medio de la diversidad de observaciones, tipos de datos, fuentes, contextos y análisis de los resultados a obtener en este proyecto (Sampieri, 2018).

Asimismo, el alcance es descriptivo, puesto que en este se tiene el interés de especificar ciertas características y propiedades de cualquier objeto de estudio, al momento de realizar mediciones y recolectar formación de manera conjunta o independiente, teniendo en cuenta los conceptos y variables que se van a trabajar en este proyecto.

Por otro lado, en el tipo de alcance, el diseño, es decir, la manera de que se recopilaron los datos, es correlacional, debido a que en este diseño se van a relacionar ciertas variables por medio de la una pauta predecible, con la finalidad de conocer el grado de asociación que exista entre las variables, mediante una medición individual y la cuantificación, para determinar los enlaces que pueda haber entre estas.

En cuanto a los alcances descriptivos y correlacionales, el presente proyecto pretende por medio de la metodología establecida obtener datos experimentales de la combinación de los residuos, ya mencionados a partir del análisis en laboratorio en donde se espera evidenciar una eficiencia mayor o igual al 60% en la obtención del biogás (metano), el cual beneficiaría a la empresa PALMERAS SAN PABLO S.A.S.

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, las variables más importantes asociadas al presente proyecto se presentan en la Tabla 3, Teniendo como unidad de análisis un sistema de digestión anaeróbica.

Tabla 3. Variables definidas.

Dimensión	Variable	Aspecto	Indicador	Técnica	Instrumento
Ecológica	Residuos vegetales	Generación	kg/día	Caracterización de residuos	Báscula, planilla de registro, calculadora.
		Sólidos totales y volátiles	% en base a peso húmedo	Gravimetría	Horno de secado, mufla, cápsulas de porcelana, pinzas, báscula analítica.
	Estiércol bovino	Producción	kg/día	Gravimetría	Báscula, planilla de registro, calculadora
		Sólidos totales y volátiles	% en base a peso húmedo		Báscula, pala, bolsas plásticas, planilla de registro, calculadora
	Estiércol porcino	Producción	kg/día	Gravimetría	Báscula, pala, bolsas plásticas, planilla de registro, calculadora
		Sólidos totales y volátiles	% en base a peso húmedo		Horno de secado, mufla, cápsulas de porcelana, pinzas, báscula analítica.
	Lodo anaerobio	Sólidos totales y volátiles	g/L	Gravimetría	Horno de secado, mufla, cápsulas de porcelana, pinzas, báscula analítica, pH metro, probeta 50 mL

	Biometano	Producción	L/mes	Desplazamiento de agua	Gasómetro
		Composición	%	Análisis composición <i>ex situ</i>	Sensor Arduino
Social	Educación	Conocimiento sobre el manejo de los residuos y sus consecuencias.	%	Encuesta	Grabadora de voz, cuestionario físico
Económico	Estructura de costos	Sensor Arduino, recolección y transporte, mantenimiento al sistema	COP/mes	Análisis de costos	Cotizaciones y comprobantes de pago

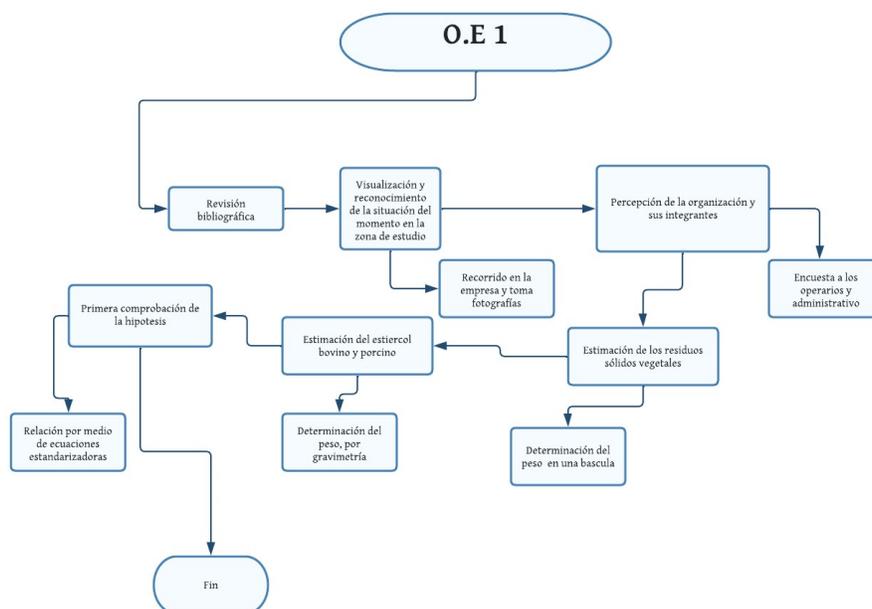
Fuente: (Autores, 2023).

5.2 Metodología del objetivo específico N°1

Establecer los subproductos generados en las diversas actividades de la Empresa PALMERAS SAN PABLOS S.A.S potencialmente aprovechables para un proceso de digestión anaerobia.

Para llevar a cabo el primer objetivo específico, se realizó una revisión de documentos. Se realizaron dos visitas técnicas al área de estudio, en donde se evidencio la cantidad de residuos generados por la empresa y se realizó un conteo de los porcinos y bovinos que están generando dichos residuos. Posteriormente se realizó por medio una observación estructurada, una ficha para determinar los residuos orgánicos. De este modo, se consideró para este objetivo un alcance y método descriptivo, debido a que este describe el contexto y la situación inicial en la cual se encuentra la finca y sus alrededores; del mismo modo, se realizó bajo el enfoque mixto, donde se determinó la generación de los residuos orgánicos y la cantidad de estiércol bovino y porcino, para proceder a realizar su respectivo análisis. Para ello, se realizaron los procedimientos descritos a continuación.

Figura 8. Esquema metodología del objetivo específico 1.



Fuente: (Autores, 2023).

5.2.1 Revisión de documentos

En este proyecto se realizó la búsqueda sobre el tema principal que es la generación de biogás a partir de residuos orgánicos agropecuarios por medio de un biodigestor de igual forma se averiguó la eficiencia de cada biodigestor y el tipo de residuo utilizado; en bases de datos como ScienceDirect, Scopus , Engineering Village.

5.2.2 Diagnóstico del área de estudio

En este método de recolección de datos se realizaron dos visitas técnicas durante el mes de abril y el mes de agosto del año presente con el fin de identificar las principales actividades desarrolladas por la empresa PALMERAS SAN PABLO S.A.S. en base a la observación directa previa que se realizó. Adicionalmente se realizaron encuestas con el fin de identificar diferentes aspectos ambientales, sociales y económicos de la empresa y la comunidad de la vereda El Santuario. Esto permitió obtener una descripción del contexto y del entorno en el cual se llevó a cabo el proyecto de una forma más detallada. La observación directa, anteriormente mencionada, se hizo mediante la toma de registros fotográficos de la empresa y sus alrededores (anexos 3-7), y el manejo y disposición de los residuos, que permiten dar un enfoque a la problemática presentada en este trabajo investigativo (Sampieri, 2014). Teniendo en cuenta lo mencionado, a través de la recolección de datos no estandarizados, que se desarrollaron dentro de la organización a un total de 3 personas, el dueño, el administrador y un laborador, en el periodo 2023-2 Figura 9, se recopiló información sobre los conocimientos y las prácticas que la empresa, sus involucrados y zonas aledañas, realizan en cuanto al manejo de los residuos sólidos (anexo 8). Esto permitió establecer una interacción entre el investigador y el individuo, a través del lenguaje escrito, verbal y visual.

Figura 9. Encuesta diligenciada por uno de los trabajadores de la empresa.



Universidad El Bosque- 2023

Encuesta para la identificación de las actividades que realizan y el conocimiento que tienen los trabajadores de la empresa PALMERAS SAN PABLO, sobre los residuos agropecuarios generados por esta misma.

UNIVERSIDAD EL BOSQUE

Esta encuesta tiene como finalidad, conocer el manejo y disposición final de los residuos agropecuarios generados por la empresa PALMERAS SAN PABLO.

NOMBRE: Sergio Quiroz Prieto EDAD: 49 años

¿Cuánto tiempo lleva trabajando en la empresa? 16 años

¿Cuál es su labor en la empresa? Gerente general

Marque con una X la respuesta correcta según corresponda

1. ¿Cuáles de los siguientes residuos se generan en mayor cantidad en la empresa?

Estiércol bovino (X) Estiércol porcino () Mesocarpio ()
2. ¿Conoce usted que es la gestión de residuos sólidos orgánicos?

Si (X) No ()

ES el manejo final adecuado de los residuos sólidos, (los cuales son degradables).
3. ¿Cree usted que estos residuos se puedan aprovechar?

Si (X) No () ¿Por qué?

se pueden aprovechar como materia orgánica en el cultivo.
4. ¿Conoce usted practicas en donde se pueda generar energía a partir de los residuos sólidos orgánicos?

Si (X) No () ¿Cuáles?

- la quema para cocina
- El gas proveniente de estos residuos.
5. ¿Usted estaría dispuesto a contribuir con el aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos agropecuarios generados en la empresa?

Si (X) No () ¿Por qué?

Debido a el alto precio del GAP, ya que la empresa subsidia el 100% de la alimentación a todo el personal, por lo que sería un ahorro económico a largo plazo.
6. ¿Cree usted que una adecuada disposición de los residuos agropecuarios contribuiría a la empresa?

Si (X) No () ¿Por qué?

ya que la inadecuada disposición genera malos olores y facilita la proliferación de plagas del cultivo.

Fuente: (Autores, 2023).

5.2.3 Cuantificación de los residuos porcinos y bovinos

La cuantificación de residuos porcinos y bovinos se realizó por medio de conteo de las especies bovinas y porcinas estabuladas. Posteriormente se realizó la recolección de estiércol generado para la estimación del promedio de los residuos generados. (Cedeño, 2019).

Para obtener la estimación del promedio generado es necesario emplear la Ecuación 2 en donde se divide la cantidad de estiércol por el número de días de recolección; seguidamente, se calculó la cantidad de

estiércol generado por cada cabeza de ganado, teniendo en cuenta el promedio ya determinado. La Ecuación 3, se aplicó a fin de determinar la producción de estiércol por cabeza de ganado.

Ecuación 1

$$\text{Promedio de estiércol diario} = \frac{\text{Cantidad de excretas (Kg)}}{\text{Número de días (d)}}$$

Ecuación 2

$$\text{Producción de estiércol por cada cabeza de ganado} = \frac{\text{Promedio de estiércol diario (Kg/d)}}{\text{Número de días (d)}}$$

5.2.3 Cuantificación de residuos vegetales

La cuantificación de los residuos vegetales generados se llevó a cabo por medio de una estimación de los residuos, en base a los datos de producción del año 2022 y los porcentajes de pérdida presentados por (Fairhurst y Griffiths, 2014; Donough et al., 2013; Corley, 2001; Wood, 1985), todo esto con el fin de determinar cuánto residuo se genera y su peso y el tipo de residuo que se genera en la empresa PALMERAS SAN PABLO S.A.S.

Ecuación 3

$$\text{Residuo vegetal (kg/día)} = \frac{\text{producción total (ha/año) del año 2022 * pérdidas (ha/año)}}{365 \text{ días}}$$

$$\text{Porcentaje pérdida \%} = \frac{\text{Producto total devengado en la planta extractora}}{\text{Residuo vegetal (pepa) recogida para el sistema}} * 100$$

(Montoya, 2012).

Tabla 4. Matriz de variables, técnicas e instrumentos para el desarrollo del primer objetivo según dimensiones.

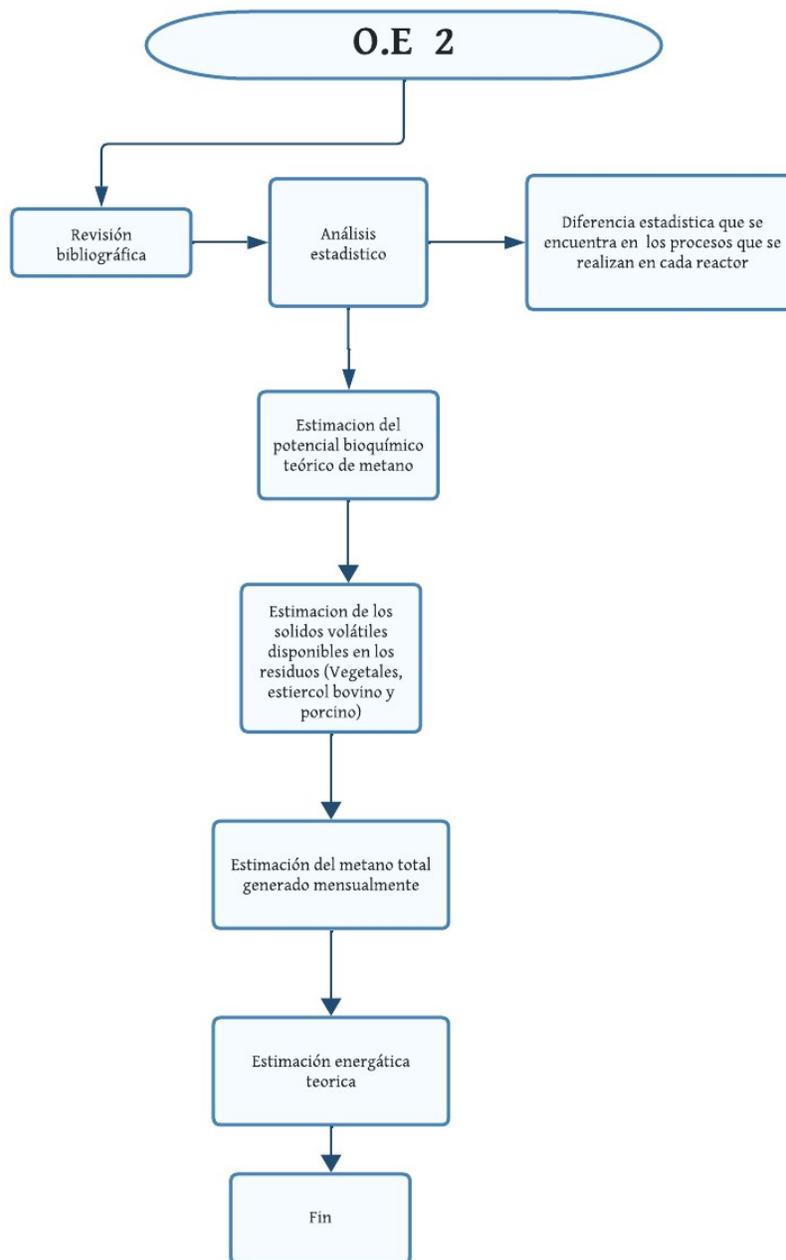
OE1					
Dimensión	Variable	Aspecto	Indicadores	Técnicas	Instrumentos
Ecológica	Estiércol Bovino	Producción	kg/mes	Observación directa	Tabla de retención documental
	Estiércol Porcino	Producción	kg/mes	Observación directa	Registro fotográfico
	Residuos Vegetales	Producción	kg/mes	Observación directa	Guión entrevista
Social	Educación Ambiental	Nivel de conocimiento	Conocimiento sobre residuos sólidos orgánicos	Entrevista	Guión entrevista
	Asistencia Técnica	Disponibilidad y tipo de asistencia	Nivel de conocimiento sobre manejo de residuos y biodigestores	Entrevista	Guión entrevista

Fuente: (Autores, 2023).

5.3 Metodología del objetivo específico N°2

Determinar el potencial energético teórico de biometano a partir de la estimación del volumen y composición de los residuos seleccionados.

Este objetivo se abordó siguiendo la metodología representada en la Figura 10, la cual implica la realización de múltiples estimaciones con el propósito de obtener una aproximación final de la producción teórica de biometano a partir de los residuos seleccionados en esta investigación.



Fuente: (Autores, 2023).

Para calcular teóricamente el Potencial Bioquímico Teórico de Metano (PBTM) en mililitros de biometano por gramo de Sólidos Volátiles (ml CH_4 /g VS) en estiércol bovino, estiércol porcino y residuos vegetales, se llevó a cabo una revisión bibliográfica. Esta revisión permitió determinar el volumen teórico de biogás, la producción de biometano y la absorción de componentes elementales, incluyendo carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N) y azufre (S), según la información

proporcionada por Stefanović et al. en 2022, y aplicando la *Ecuación 4*. En la *Tabla 5* se logra observar más a detalle la composición de los residuos sólidos orgánicos. Cabe aclarar que, los datos obtenidos del residuo vegetal son de las fibras de la nuez de la palma de aceite, pero no es exactamente la composición de los residuos empleados, pero es una buena aproximación a estos.

Tabla 5. *Composición de los residuos sólidos orgánicos.*

Composición	EB (% en seco)	EP (% en seco)	RV (% en seco)
C	45.54	41.18	30.02
H	6.31	5.67	3.81
O	38.25	34.58	23.35
N	2.2	3.86	0.89
S	0.58	0.37	0.19
C/N	20,7	10,67	33,73

Adaptado de: (Font-Palma, 2019; Watson et al., 2018; Abdullah et al., 2007)

Ecuación 4

$$a = \%biomasa/mmC, b = \%biomasa/mmH, c = \%biomasa/mmO, d = \%biomasa/mmN, e = \%biomasa/mmS$$

$$a = \%biomasa/12,0107, b = \%biomasa/1,0079, c = \%biomasa/15,999, d = \%biomasa/14,0067, e = \%biomasa/32,065$$

Luego se obtuvo el TBPM aplicando un factor limitante ($f=80\%$), con el fin de reducir la desviación de los valores teóricos frente a los reales (experimentales), basados en la fórmula estequiométrica desarrollada por Buswell y Hatfield en 1936, (*Ecuación 5*), (*Tabla 3*).

Ecuación 5

$$(a) TBMP(EB) = \frac{22,4 * \left(\frac{a}{2} + \frac{b}{8} - \frac{c}{4} - \frac{3d}{8} - \frac{e}{4} \right)}{12,017a + 1,0079b + 15,999c + 14,0067d + 32,065e} * 1000$$

$$(b) TBMP(EP) = \frac{22,4 * \left(\frac{a}{2} + \frac{b}{8} - \frac{c}{4} - \frac{3d}{8} - \frac{e}{4} \right)}{12,017a + 1,0079b + 15,999c + 14,0067d + 32,065e} * 1000$$

$$(c) TBMP(RV) = \frac{22,4 * \left(\frac{a}{2} + \frac{b}{8} - \frac{c}{4} - \frac{3d}{8} - \frac{e}{4} \right)}{12,017a + 1,0079b + 15,999c + 14,0067d + 32,065e} * 1000$$

Donde:

% Biomasa = Es el valor hallado en la literatura de la composición de C, H, O, N y S en porcentaje de EB, EP y RV.

mm= Masa molar de los elementos C, H, O, N y S.

TBMP= Potencial bioquímico teórico de biometano (mL CH_4 /g VS).

Posteriormente, se encontraron los SV disponibles de los RSA (kg SV mes) por medio de la *ecuación 6* (Tabla 18), y se obtuvo el biometano total generado (*Ecuación 7*), consignado en la *Tabla 17*

Ecuación 6

$$(a) SV (EB) = [\%SV (EB)] * 24 g,$$

$$(b) SV (EP) = [\%SV (EP)] * 24 g,$$

$$(c) SV(RV) = [\%SV (RV)] * 24g$$

Ecuación 7

$$(a) Total CH_4 (EB) = TBMP (EB) * SV (EB),$$

$$(b) Total CH_4 (EP) = TBMP (EP) * SV (EP)$$

$$(c) Total CH_4 (RV) = TBMP (RV) * SV(RV)$$

Luego, se llevó a cabo la estimación de producción de energía eléctrica a partir del biometano teórico obtenido, según la fórmula y los parámetros adoptados por Kythreotou et al., (2012) a partir de los datos de la *Tabla 6* y la *Ecuación 8* como se evidencia a continuación:

Tabla 6. *Parámetros usados para la estimación del potencial de producción de energía eléctrica*

Composición	EB (% en seco)	EP (% en seco)	RV (% en seco)
C	45.54	41.18	30.02
H	6.31	5.67	3.81
O	38.25	34.58	23.35

Adaptado de: (Font-Palma, 2019; Watson et al., 2018; Abdullah et al., 2007)

De acuerdo con lo anterior, la energía eléctrica y térmica se calculó mediante el método propuesto por Kythreotou, Tassou y Florides (2012). Para ello se utilizaron datos como la eficiencia eléctrica del generador es del 35%; La densidad de energía del biometano y la densidad del biometano son 55,6 MJ/kg y 0,6556 MJ/m³ respectivamente. Calculado usando la *ecuación 8*.

Ecuación 8

$$\text{Energía Eléctrica} = \frac{CH_4 (m^3) \times EF(EL)(\%) \times DCH_4 (kg/m^3) \times EN(CH_4) (MJ/kg)}{3,6 (MJ/kWh)} * 100$$

Donde:

Energía Eléctrica= Producción de energía eléctrica (KWh)

CH_4 = Total CH_4 (m^3)

EF(EL)= Eficiencia eléctrica del generador (%)

D (CH_4)= Densidad del metano (kg/m^3)

EN (CH_4)= Densidad energética del metano (MJ/kg)

Tabla 7. Matriz de variables, técnicas e instrumentos para el desarrollo del segundo objetivo según dimensiones.

OE2					
Dimensión	Variable	Aspecto	Indicadores	Técnicas	Instrumentos
Ecológica	Estiércol Bovino	Producción	m^3 /mes	Cálculos	Tabla de cálculos
Económica	Estiércol Porcino	Producción	kWh	Cálculos	Tabla de cálculos

Fuente: (Autores, 2023).

5.4 Metodología del objetivo específico N°3

Valorar la producción de biometano y la generación de lodos resultantes, a partir de distintas proporciones de los residuos orgánicos establecidos, mediante la implementación de un sistema de co-digestión anaerobia a escala laboratorio.

Para desarrollar el tercer objetivo específico, se realizó un enfoque cuantitativo, en el cual se realizaron pruebas de laboratorio y se implementó un sistema de co-digestión mediante el uso de reactores anaerobios a nivel ex situ. En donde se realizaron en total dieciocho prototipos, los cuales contenían los sustratos puros que se utilizaron, estiércol bovino, estiércol porcino, pepa de palma africana, en los restantes se realizó una mezcla entre los tres sustratos principales. Lo cual contribuyó a analizar y comparar la concentración de biometano de cada reactor, teniendo en cuenta las proporciones utilizadas y las mediciones de gas en los gasómetros. Este objetivo tiene un alcance correlacional, el

cual tiene como finalidad conocer la relación o grado de asociación entre cada una de las proporciones que están dispuestas por reactor y sus respectivas variables. Inicialmente se midieron los dieciocho reactores y se llevó a cabo la cuantificación para realizar su respectivo análisis; por lo tanto, el método planteado para este objetivo fue experimental.

5.3.1 Determinación de sólidos volátiles y sólidos totales

La determinación de sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (SV) se desarrolló a partir de los residuos orgánicos seleccionados para el proceso de co-digestión anaerobia (residuos orgánicos, estiércol bovino y porcino) y del lodo anaerobio empleado como inóculo (antes y después del periodo operacional (Zhang C. et al., 2013).

Ecuación 9

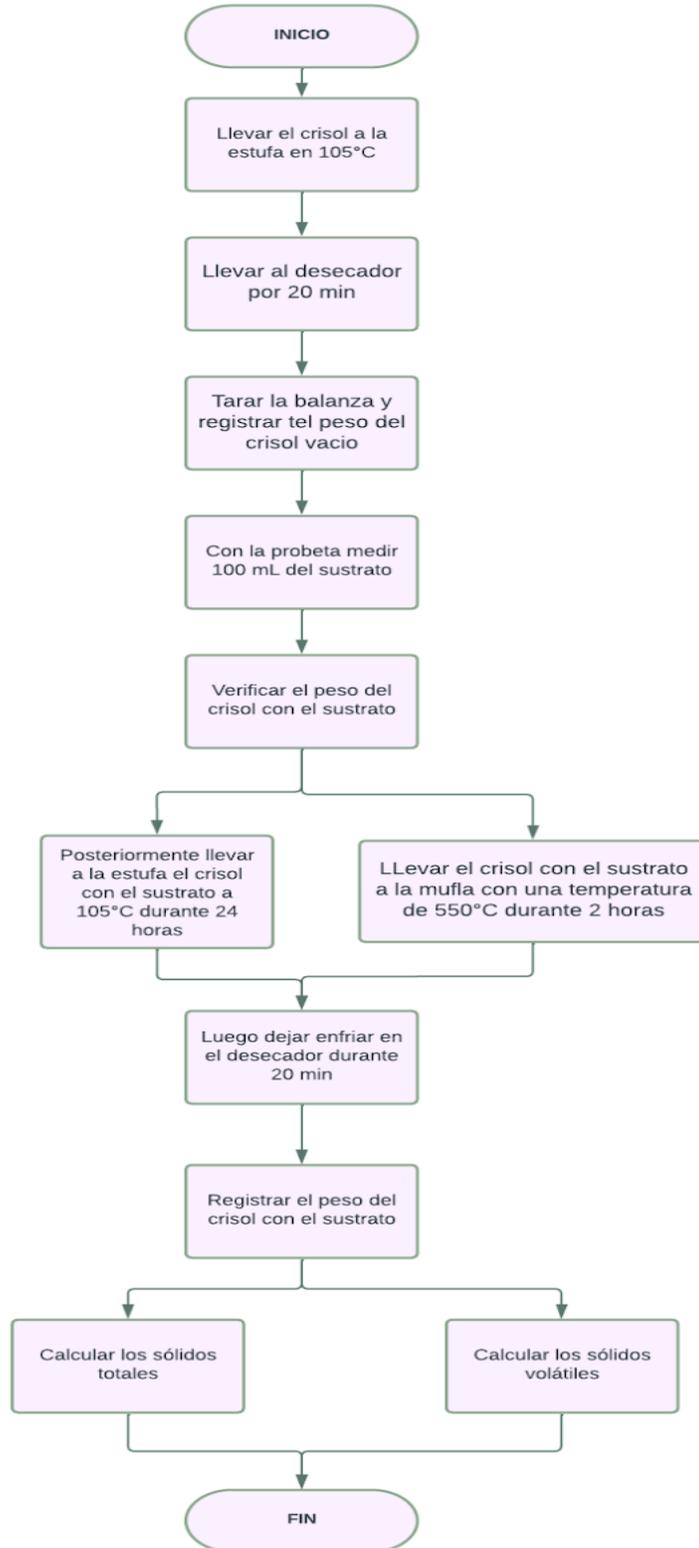
$$ST = \frac{\text{Peso después de horno a } 105\text{ }^{\circ}\text{C (g)} - \text{Peso inicial de la cápsula (g)}}{\text{Cantidad de muestra empleada (g)}}$$

Ecuación 10

$$SV = \frac{\text{Peso después de horno a } 105\text{ }^{\circ}\text{C} - \text{Peso después de mufla a } 550\text{ }^{\circ}\text{C}}{\text{Cantidad de muestra empleada (g)}}$$

La figura 11 proporciona una visión detallada de la metodología de laboratorio que se implementó para la determinación de los sólidos totales y volátiles presentes en los sustratos empleados en este proyecto. Estos sustratos incluyeron estiércol bovino, porción y pepa de palma. Esta metodología fue fundamental para la obtención de datos precisos sobre la composición de estos materiales orgánicos, lo que a su vez resultó crucial para el desarrollo del proyecto.

Figura 11. Metodología para la determinación de sólidos volátiles y totales.



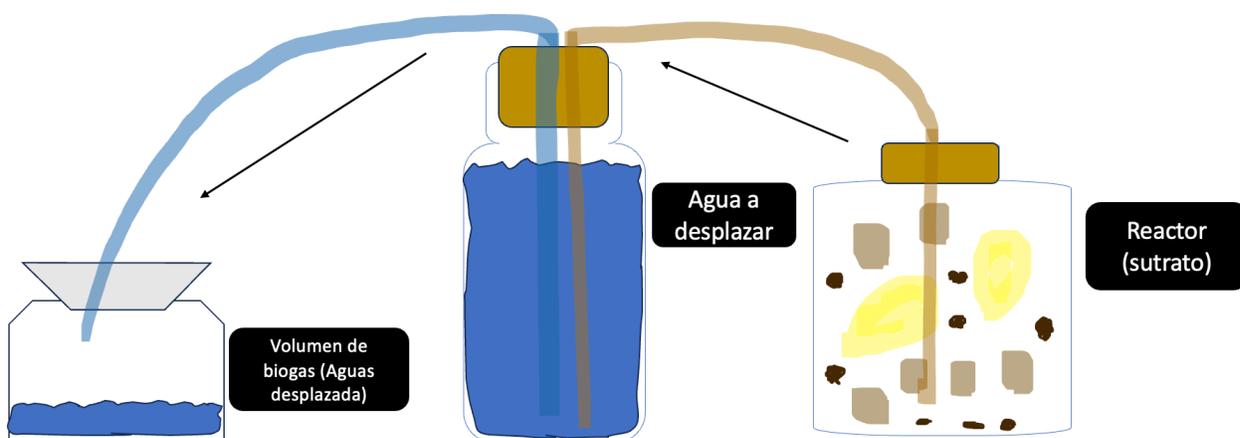
Fuente: (Autores, 2023).

5.3.2 Montaje del sistema a escala laboratorio a escala laboratorio

En este proyecto, se llevaron a cabo 3 prototipos de biodigestores en el laboratorio. Cada prototipo se replicó tres veces, lo que resultó en un total de 9 réplicas. Cada una de estas réplicas consistió en la disposición de tres envases de vidrio, en los cuales se implementaron tres sistemas diferentes. Estos sistemas variaron en las proporciones de los sustratos que se agregaron a los reactores; estos reactores estuvieron condicionados a una temperatura media de 30°C. La temperatura y el montaje final con resistencia se presentan en (Anexo 20, 21, 38 y 47).

Las proporciones de los sustratos combinados se distribuyeron de la siguiente manera: 1:1:1, 3:1:1 y 1:3:1, como se detalla en la tabla 8. Este enfoque se utilizó para equilibrar la cantidad de cada sustrato, compensando aquel que estaba presente en menor cantidad. Además, se llevaron a cabo otros reactores en los que se utilizó el 100% de un solo sustrato en cada caso. Esto se hizo con el propósito de evaluar las características individuales de cada sustrato y confirmar su eficiencia en el proceso.

Figura 12. Prototipo de biodigestor ex situ.



Fuente: (Autores, 2023).

En la *Tabla 8* se indica la cantidad de sustrato a emplear en cada reactor, estos pesos reales se encuentran en el Anexo 10, 11 y 12.

Tabla 8. *Proporciones de los tratamientos implementados.*

Reactor	Cantidad estiércol porcino (g)	Cantidad estiércol bovino (g)	Cantidad residuo vegetal (g)
Reactor 1 (T1) - 1.3.1	14,4	43,2	14,4
Reactor 2 (T2) - 3.1.1	43,2	14,4	14,4
Reactor 3 (T3) 1.1.1	24	24	24

Fuente: (Autores, 2023).

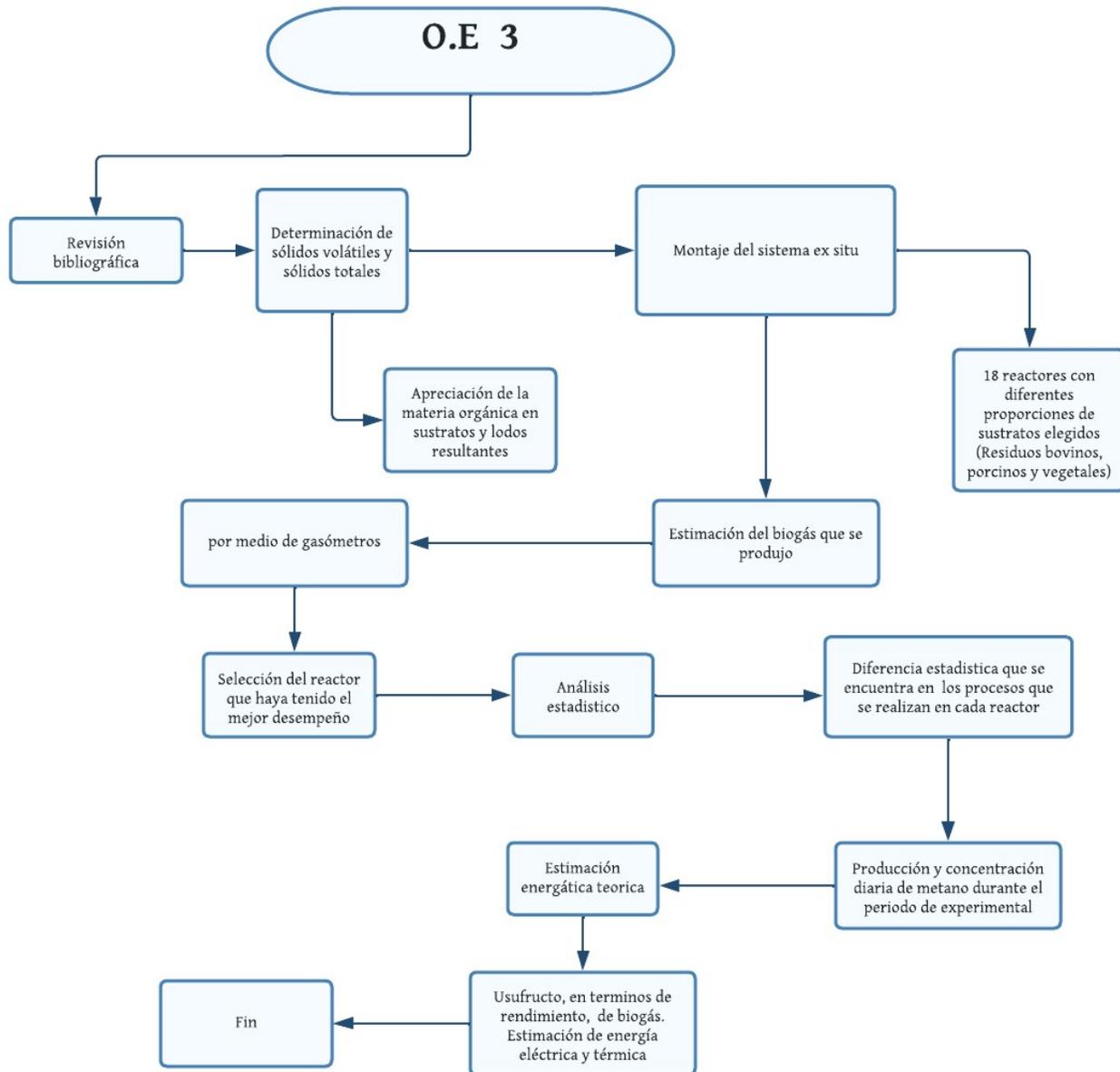
5.3.3 Estimación de biogás producido

La producción de biogás se midió diariamente utilizando gasómetros contruidos con recipientes de vidrio. Esta medición se realizó con la ayuda de una cinta métrica la cual permitió observar el desplazamiento vertical de los gasómetros, descargando el gas almacenado en ellos cada vez que se realizó la lectura (Villa, 2015).

Este objetivo se llevó a cabo utilizando un enfoque mixto, que implicó una primera selección del sistema de co-digestión anaerobia. Se eligieron proporciones específicas para obtener el mejor rendimiento en términos de producción de biometano. Posteriormente, se calculó el rendimiento energético del reactor seleccionado con el propósito de analizar las posibles alternativas para proyectos futuros que pudieran implementarse. En este tercer objetivo, se utilizó un enfoque experimental con un alcance correlacional.

En la Figura 13 se puede apreciar la metodología que se llevó a cabo en el objetivo 3 durante su desarrollo. En este objetivo, se implementaron una serie de pasos y procesos específicos que resultaron fundamentales para la consecución de los resultados deseados. Estos procedimientos se llevaron a cabo de manera metódica y detallada, lo que permitió obtener datos significativos y completos en el contexto de la investigación.

Figura 13. Esquema metodología del objetivo específico 3.



Fuente: (Autores, 2023).

5.4.1 Selección de proceso de co-digestión de mejor rendimiento

Para determinar el porcentaje, en términos de proporciones, de residuos que permitió el desarrollo de procesos más eficientes, se calcularon las concentraciones de biometano durante las horas de funcionamiento y la producción diaria, teniendo en cuenta que los datos fueron proporcionados por sensores Arduinos integrados al reactor. La estimación se plasmó por medio de gráficas por días

operados. Bastaba elegir la alternativa con el mejor rendimiento, la cual se identificó desde el inicio de la fase de estabilidad operativa. (coeficiente de variación, $CV < 30\%$) para el parámetro de producción diaria de biometano (Ecuación 11) (Guardia et al., 2014). Posteriormente fue realizado el análisis estadístico descrito a continuación.

Ecuación 11

$$CV = (\text{Desviación estándar/promedio}) * 100$$

A partir de los datos obtenidos en cada uno de los tratamientos realizados empleadas, asociados a la proporción de subproductos evaluados en el sistema de co-digestión, que se asocian a la producción diaria de biometano obtenida y teniendo en consideración el intervalo de tiempo de estabilidad operacional ($CV < 30\%$), fue realizado un análisis estadístico con la finalidad de establecer si existía diferencia estadísticamente significativa. Para ello, inicialmente fue verificada la normalidad de la distribución de los datos mediante la prueba de Shapiro-Wilk. Posteriormente, los datos se compararon utilizando el análisis de varianza unidireccional (ANOVA) seguido de la prueba de Tukey con un nivel de significancia del 5%. Todos los análisis fueron realizados usando el software R (Versión 4.3.2).

5.4.2 Estimación energética

Con el propósito de estimar la producción de energía del sistema y proceso seleccionado, se llevó a cabo un cálculo, que dio inicio con la evaluación del rendimiento del biogás basado en el volumen acumulado. Para esto, se aplicó la metodología propuesta por López y Ruiz (2014), que implica la división del biogás acumulado por el peso de los sólidos volátiles (SV) de los sustratos utilizados (según la *ecuación 12*). Los SV de los residuos vegetales, así como el estiércol bovino y porcino, se calcularon utilizando la *Ecuación 13*, ya que estos valores se expresan como porcentaje del peso en estado húmedo. Es importante destacar que las unidades volumétricas se trabajaron en mililitros durante este proceso de cálculo.

Ecuación 12

$$\text{Rendimiento biogás} = \frac{\text{Volumen acumulado biogás (mL)}}{\text{g SV sustrato adicionado}}$$

Ecuación 13

$$\text{Masa SV sustratos} = \%SV * \text{peso adicionado a reactor (g)}$$

Es importante destacar que el rendimiento total del sistema seleccionado, que corresponde al valor que se obtendría al finalizar el día de prueba, se calculó en tiempo pasado.

En línea con lo anterior, tanto la energía eléctrica como la térmica se calcularon utilizando la metodología propuesta por Kythreotou, Tassou y Florides (2012). Para estos cálculos, se utilizaron datos teóricos, como la eficiencia del generador de energía eléctrica y térmica, que se situaron en el 35% y el 50%, respectivamente. Además, se consideraron la densidad de energía del biometano, que es de 55.6 MJ/kg,

y la densidad del biometano, que equivale a 0.6556 MJ/m^3 , en el proceso de cálculo, todos estos elementos fueron tomados en cuenta en el pasado.

Ecuación 14

$$\text{Energía eléctrica} = \text{BG} * \text{CH}_4 * \text{EEI} * \text{pCH}_4 * (\text{pECH}_4 / 3,6)$$

Ecuación 15

$$\text{Energía térmica} = \text{BG} * \text{CH}_4 * \text{ET} * \text{pCH}_4 * (\text{pECH}_4 / 3,6)$$

Donde,

BG: Volumen de biogás acumulado (m^3)

CH_4 : Porcentaje de metano contenido en el biogás (%)

EEI: Eficiencia eléctrica del generador (%)

ET: Eficiencia térmica del generador (%)

pE CH_4 : Densidad de la energía del metano (MJ/kg)

pCH_4 : Densidad del metano (MJ/m^3)

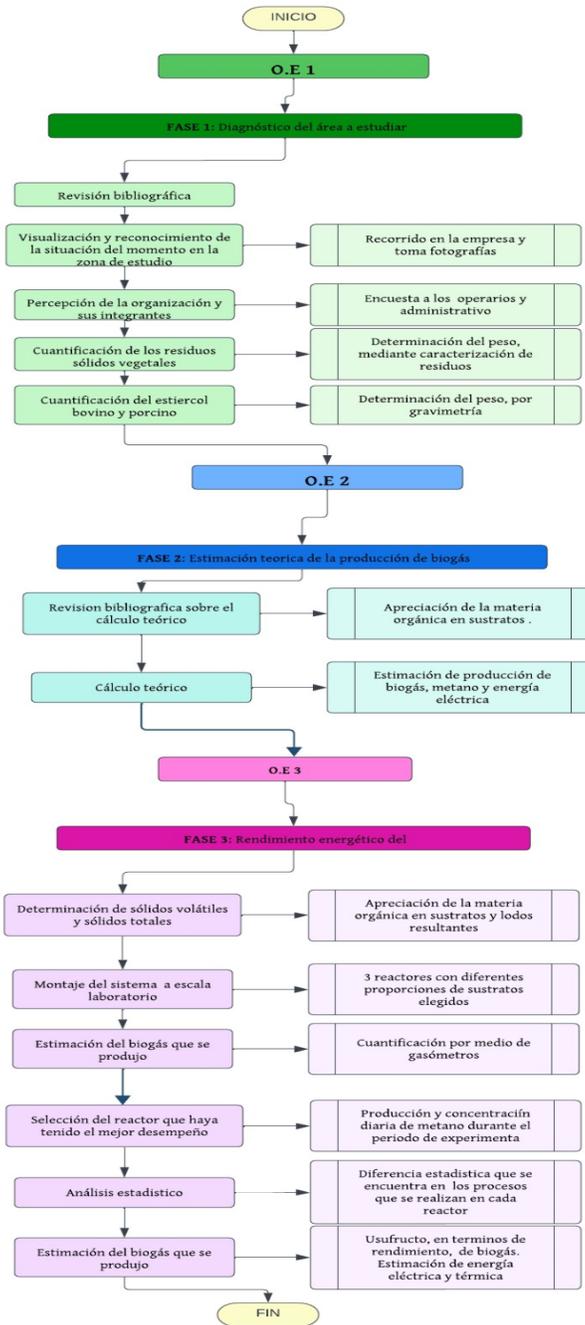
Además, se llevó a cabo la caracterización física de los lodos generados como resultado del proceso de co-digestión anaerobia en cada uno de los reactores. Es relevante destacar que esta caracterización se efectuó en tres ocasiones, con el propósito de obtener un promedio que aumente la precisión de los resultados obtenidos.

5.5 Plan de trabajo.

5.5.1 Esquematización etapas del trabajo

En el esquema siguiente, se proporciona una descripción detallada de cada paso involucrado en la elaboración de las fases del proyecto, como se ilustra en la Figura 14. Cada paso se presenta de manera minuciosa para ofrecer una comprensión exhaustiva de la secuencia de acciones y procesos que se llevaron a cabo en la ejecución de las distintas etapas del proyecto. La *Figura 14* sirve como una guía visual para visualizar claramente la estructura y el flujo de trabajo de todo el proyecto.

Figura 14. *Esquematización de las diferentes etapas del trabajo investigativo.*



Fuente: (Autores, 2023).

5.5.2 Cuadro metodológico

A continuación, se presenta la matriz que detalla la metodología utilizada en el desarrollo de este trabajo. Además, es importante mencionar que este plan de trabajo se encuentra respaldado por un presupuesto detallado y un cronograma de actividades. Para consultar en detalle el presupuesto y el cronograma, se pueden encontrar en el Anexo 39 y 40 respectivamente. Estos anexos proporcionan una visión completa

y detallada de la planificación financiera y la programación de tareas relacionadas con el proyecto en cuestión.

Tabla 9. Metodología del proyecto.

Objetivo General	FASE 1 Preparación	Fase 2 Operación	FASE 3 Análisis
Evaluar la producción de biometano a partir de la co-digestión anaerobia subproductos sólidos orgánicos de origen agropecuario, generados en la empresa “PALMERAS SAN PABLO S.A.S”, vereda “El Santuario”, Puerto Lleras (Meta).	Objetivo E. 1	Objetivo E. 2	Objetivo E. 3
	Establecer los subproductos generados en las diversas actividades de la Empresa PALMERAS SAN PABLOS S.A.S potencialmente aprovechables para un proceso de digestión anaerobia.	Determinar el potencial energético teórico de biometano a partir de la estimación del volumen y composición de los residuos seleccionados.	Valorar la producción de biometano y la generación de lodos resultantes, a partir de distintas proporciones de los residuos orgánicos establecidos, mediante la implementación de un sistema de co-digestión anaerobia a escala laboratorio.
Alcance	Descriptivo	Correlacional	Correlacional
Enfoque	Mixto	Cuantitativo	Mixto
Método	Descriptivo	Experimental	Experimental
Técnicas	Encuesta, entrevista, caracterización de residuos, análisis de carga, gravimetría, observación no estructurada, análisis de información	Análisis detallado de la composición del sustrato, incluidos los porcentajes de carbono, nitrógeno y otros elementos presentes. Consideración de parámetros específicos de operación, como la temperatura, el pH, la relación carbono/nitrógeno (C/N), la actividad microbiana y el tiempo de retención hidráulica (TRH).	Desplazamiento en gasómetros (medición de biogás), monitoreo en tiempo real de concentración de metano y temperatura, gravimetría (práctica de laboratorio), análisis de información. Monitoreo en tiempo real de concentración de metano y temperatura por Arduino, análisis

		Uso de modelos matemáticos específicos, como modelos cinéticos de digestión anaeróbica.	estadístico, cálculo teórico.
Instrumentos	Cuestionario, grabadora de voz, balanza, planilla de registro, calculadora, pala, cámara.	Herramientas de software y tablas de cálculo	Gasómetro, sensor Arduino, biodigestor, materiales de laboratorio, planilla de registro, cámara, herramientas de software
Resultados esperados	Conocer la problemática actual sobre manejo de los residuos sólidos en la empresa PALMERAS SAN PABLO S.A.S y la cantidad se va a usufructuar.	<p>Estimar el volumen total de biogás que se puede producir a partir del sustrato dado. Asimismo, realizar una estimación de la composición del biogás producido, en porcentajes de metano (CH_4).</p> <p>Considerar el potencial de energía del biogás producido, que a menudo se expresa en términos de equivalente de kilovatios-hora (kWh) o megajulios (MJ). Esta estimación puede ayudar a evaluar el potencial de generación de energía a partir del biogás producido.</p>	<p>Comparar la producción de biogás y las características de los lodos generados, generada en seis sistemas de digestión anaerobia, empleando proporciones definidas de materia orgánica (residuo vegetal y dos tipos de estiércol)</p> <p>Seleccionar el sistema de digestión anaerobia más eficiente y estimar su rendimiento energético.</p>

Fuente: (Autores, 2023).

6. Resultados, análisis y discusión

6.1 Objetivo específico 1.

6.1.1 Diagnóstico del área de estudio y aplicación de entrevista

Durante las visitas técnicas de campo realizadas, se desarrolló un minucioso diagnóstico de los residuos sólidos generados por PALMERAS SAN PABLO S.A.S. El propósito de estas fue la clasificación y cuantificación de los residuos producidos en las instalaciones. Se llevó a cabo la identificación de la clase de residuos que presentaba la mayor cantidad de generación, con la finalidad de evaluar su viabilidad para su posterior aprovechamiento y definir la proporción óptima a aplicar en esta alternativa.

A través de la observación directa y la recopilación de información in situ, se lograron identificar dinámicas específicas en el manejo de los residuos sólidos de origen agropecuario en el área de estudio. Se llegó a la conclusión de que el manejo de estos residuos era inapropiado, ya que, dentro de las prácticas de la empresa, se observó que estos residuos se depositaban en el entorno sin ningún tipo de control, tal como se puede apreciar en la *Figura 15*. Asimismo, se constató que dichos residuos no estaban siendo aprovechados adecuadamente, a pesar de su potencial utilidad en otros procesos

Figura 15. Diagnóstico inicial del lugar de estudio.

		
Proliferación de plagas cerca a asentamiento de rebaño porcino	Ganadería como actividad secundaria en esta empresa	Actividad económica predominante de la empresa

		
<p>Actividad económica secundaria de esta empresa</p>	<p>Calidad superficial del suelo en verano</p>	<p>Residuo vegetal en el transporte del producto</p>

Fuente: (Autores, 2023).

Como parte del diagnóstico asociado a la generación de residuos sólidos agropecuarios en la empresa PALMERAS SAN PABLO, se realizaron encuestas a 3 personas clave, uno de estos es el dueño de la compañía, el otro es un supervisor de esta plantación y por último, un habitante aledaño a esta organización, propietario de una finca vecina. Las personas que hicieron parte de las entrevistas ampliaron la percepción sobre el conocimiento y manejo de los residuos sólidos agropecuarios, asociados a los aspectos ambientales, sociales y económicos. Gran parte de las preguntas realizadas fueron enfocadas a identificar el nivel de conocimiento y prácticas que se utilizan en cuanto al manejo integral de los residuos sólidos en la empresa. Los resultados de estas entrevistas construyen la percepción y conocimiento que se tienen con respecto a la generación, manejo y disposición final de los mismos.

6.1.2 Caracterización de residuos sólidos

Esta caracterización se llevó a cabo por medio de la priorización de la cantidad de residuos generados en esta empresa, es decir por recolección selectiva, algo que no se realiza en este lugar. Con esto se determinó el peso de cada residuo, recolectado previamente con 5 días. Todo esto con la finalidad de determinar las proporciones más llamativas para la construcción de los reactores y su viabilidad de este sistema en esta empresa.

6.1.3 Estimación del estiércol bovino

Se llevó a cabo la estimación de la producción de estiércol bovino en las instalaciones de la empresa PALMERAS SAN PABLO S.A.S. Donde actualmente se mantiene, un rebaño compuesto por 200 cabezas de ganado de las razas Brahman gris, Brahman negro y Brangus destinadas a la producción de carne. La estimación se basó en la realización de cinco aforos en un grupo de 7 animales pertenecientes a las razas mencionadas, con el objetivo de determinar el promedio diario de producción de estiércol (Anexo 44). Esto se expresó en términos de kilogramos por cabeza de ganado. Los resultados se compararon con los obtenidos por Briceño y Delgadillo en 2021, cuyo promedio fue de 11.21 kg/cab*d.

Es importante destacar que estas cantidades pueden variar en función de diversos factores, como la alimentación proporcionada, el tipo de ración y su digestibilidad, la edad del ganado, las condiciones del

entorno y el estado de salud general de los animales (según lo mencionado por P. Pérez & Viniegra en 1983).

Tabla 10. *Aforo de estiércol bovino.*

<i>AFOROS</i>	<i>PESO (kg)</i>
1	136,7
2	127,5
3	133,2
4	131,4
5	129,1

Fuente: (Autores, 2023).

Diversos autores estiman que para la cuantificación de estiércol que se dispone diariamente, es necesario tener en cuenta si el ganado es de pastoreo o estabulado, en este caso es de pastoreo. Por lo tanto, se estimó que el estiércol producido por cada 100 kg de del animal bovino, es de 8 kg y que el peso estimado de una cabeza de ganado lechero es de 550 kg, se deben generar alrededor de 44 kg de estiércol (Pérez et al., 2017). Estos datos se consiguieron a partir de aforos en diferentes días, donde los animales estuvieron estabulados medio día (12 horas aproximadamente) y estuvieron libres en un potrero aledaño a lugar de estabulación, para su fácil encierro en los días consiguiente.

Tabla 11. *Cantidad de estiércol bovino diario.*

Producción por animal	18,79 kg/cab. *día
Producción media de estiércol por total de bovinos	3.759 kg/día

Fuente: (Autores, 2023).

6.1.4 Estimación del estiércol porcino

La estimación de estiércol porcino se realizó en la empresa PALMERAS SAN PABLO S.A.S, mediante tres aforos, en función de 5 marranos estabulados (Anexo 7), donde actualmente se mantienen 100 marranos de diversas razas para la producción cárnica. Teniendo como referencia lo propuesto por los autores, que un marrano promedio produce como media 2,36 kg/cab. *d (Briceño y Delgadillo, 2021).

a. **Tabla 12.** *Aforo de estiércol porcino.*

<i>AFOROS</i>	<i>PESO (kg)</i>
<i>1</i>	<i>13,2</i>
<i>2</i>	<i>13,7</i>
<i>3</i>	<i>14,4</i>

Fuente: (Autores, 2023).

Se enfatiza que estas cantidades pueden variar dependiendo de varios factores como la dieta, incluido el tipo de alimento y su digestibilidad, la edad del porcino, las condiciones ambientales y el estado general del animal. (P. Pérez & Viniegra, 1983).

b. **Tabla 13.** *Cantidad de estiércol porcino diario.*

Producción por animal	2,75 kg/cab. *día
Producción media de estiércol	275 kg/día

Fuente: (Autores, 2023).

6.1.5 *Estimación del residuo vegetal*

Esta estimación se puso en marcha realizando un censo de producción de la palma *Tabla 14*, donde según Fairhurst y Griffiths (2014). Se presentan pérdidas anuales en frutos no cosechados y sueltos no recolectados de 200 kg/ha y de 65 kg/ha, respectivamente (Anexo 45). Por medio de esto, se pudo realizar la estimación aproximada de residuo vegetal en la palmera, con el fin de realizar un promedio para tenerlo como valor base para realizar proyecciones. Cabe destacar que, la producción en este agronegocio varía, ya que la producción de oleina de palma cambia por temporadas, encontrando que en el primer semestre del año es donde más se produce pepa, por lo que, por obvias razones la pérdida en esa temporada es mayor.

Tabla 14. *Censo de producción año 2022.*

MES	PRODUCCIÓN TONELADAS
<i>Enero</i>	<i>101,80</i>
<i>Febrero</i>	<i>292,480</i>
<i>Marzo</i>	<i>439,770</i>
<i>Abril</i>	<i>287,660</i>

<i>Mayo</i>	<i>169,210</i>
<i>Junio</i>	<i>104,240</i>
<i>Julio</i>	<i>120,060</i>
<i>Agosto</i>	<i>94,190</i>
<i>Septiembre</i>	<i>139,480</i>
<i>Octubre</i>	<i>140,970</i>
<i>Noviembre</i>	<i>140,130</i>
<i>Diciembre</i>	<i>107,670</i>
TOTALES	<i>2.137,040</i>

Fuente: (Autores, 2023).

Con lo anterior, se realizó la estimación de este residuo, dando como resultado anual una pérdida de 84,8 toneladas por la totalidad de hectáreas sembradas, las cuales son trescientas sesenta hectáreas en aproximación, es decir, una pérdida aproximada del 4% de la producción total, considerando que la producción mensual por hectárea es en promedio de 178 toneladas, diciendo de otra manera se generan 19,6 kg/ha de residuos vegetales al mes en la producción, en otras palabras 235 kg/día.

Tabla 15. *Rendimiento en empresas palmicultoras.*

FACTOR	RANGO EN LAS REGIONES PRODUCTORAS	EFFECTOS EN EL RENDIMIENTO MEDIDOS EN LOS CASOS DE ESTUDIO
Recuperación del cultivo en el campo	Varía desde recuperación casi completa a menos del 70% del fruto	<ul style="list-style-type: none"> - Pérdidas anuales bajo un estricto régimen de cosecha con intervalos de 7 días: 200 kg RFF/ha no recolectados y 65 kg/ha de frutos sueltos no recolectados - Recolección incompleta de frutos sueltos: pérdida promedio de >5% - Pérdidas de rendimiento reportadas de hasta 5 t/ha debido a una recuperación deficiente del cultivo.

Fuente: Adaptado de (Fairhurst y Griffiths, 2014; Donough et al., 2013; Corley, 2001; Wood, 1985).

6.2 Objetivo específico 2.

La cantidad de biometano producido se determinó en función de la composición elemental y la cantidad de residuo seco (SV) presente en el RSA. Primero, se establece un modelo de Buswell para determinar los coeficientes estequiométricos de moléculas biodegradables (a, b, c, d y e), donde la composición de los elementos del biogás (C, H, O, N, S), por medio de las constantes elementales dadas en la *Tabla 16*, asumiendo una temperatura constante, una digestión anaerobia completa, se da donde las bacterias están en condiciones ideales y los productos de reacción son solo CH_4 , CO_2 , NH_3 y H_2S (Achinas et al., 2016).

Tabla 16. Constantes estimadas de los RSO.

Constante de elementos	EB (%)	EP (%)	RV (% aprox.)
a	3,790	3,427	2,498
b	6,261	5,626	3,780
c	2,391	2,161	1,459
d	0,157	0,276	0,064
e	0,018	0,012	0,006

Fuente: (Autores, 2023).

Este resultado luego se utilizó para calcular el potencial bioquímico teórico del metano (PBTM) según la Ecuación 16, la cual se corrige multiplicando el valor obtenido por el factor limitante $f=80\%$, como se muestra en la *Tabla 17*. La digestión anaerobia se utiliza para ajustar el valor del gas producido en condiciones ideales (no es exactamente realista porque el residuo no está 100% degradado) al gas producido en condiciones reales, reduciendo la desviación entre los valores teóricos y los valores experimentales (Achinas et al., 2016).

Al realizar las comparaciones de los valores de TBMP ajustados con datos experimentales de la literatura, hay poca discrepancia para la producción de biometano obtenida como lo expone Perin et al., (2020), al obtener un rendimiento específico de 470 mL CH_4/g SV durante la codigestión anaeróbica de EB, EP y RV, valor que se aproxima al potencial ideal tanto de los RV como de los EB y EP frente al valor ajustado.

Tabla 17. *Potencial Bioquímico Teórico de Metano (TBPM) RSA con ajuste.*

<i>TBMP</i>	mL CH_4/g SV	mL CH_4/g SV (factor $f=80\%$)
(EB)	486,26	389,01
(EP)	462,86	370,29
(RV)	511,90	409,52
T1*	486,50	389,20
T2*	477,00	381,60
T3*	487,01	389,61

*: Valores teóricos de la co-digestión para los tratamientos evaluados.

Fuente: (Autores, 2023).

Los rendimientos teóricos de gas basados en el modelo de Boyle pueden proporcionar información útil y permitir comparar el potencial de diferentes materiales en función de su composición. Este es un modelo simple que se puede aplicar fácilmente a diferentes materias primas cuando se conoce la composición de los elementos carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre (Achinas et al., 2016).

Tabla 18. Sólidos Volátiles de los RSA.

Sólidos Volátiles disponibles de los RSA	%SV	g SV/ mes
(EB)	79,58	8974236,6
(EP)	79,68	657360,0
(RV)	61,97	436888,5
T1*	-	893916,5
T2*	-	348874,17
T3*	-	519890,5

*: Valores teóricos de la co-digestión para los tratamientos evaluados.

Fuente: (Autores, 2023).

Dependiendo de la cantidad total de biometano producido, se puede determinar su idoneidad según los objetivos de la empresa, teniendo en cuenta posibles usos: combustión directa (estufas, iluminación, sistemas de secado, quemadores, calentadores), electricidad (motores, turbinas) y créditos de carbono (Vallejo, W., 2008).

El biometano producido en mayor cantidad en teoría, es T3, ya que alcanza un máximo de 389,61 mL CH_4 /g SV, teniendo en cuenta que T1 presenta una mayor cantidad de g SV/mes, produciendo una mayor cantidad de biometano que los demás tratamientos, está produciendo teóricamente 347,91 m^3 , pero el tratamiento escogido fue T3, esto por diversos motivos contrastados con análisis estadísticos en la siguiente sección de este documento (Figura 18-22), este tratamiento produjo en teoría una cantidad de biometano de (202,55 m^3), los cuales se pueden utilizar directamente como fuente de energía en los restaurantes de la empresa PALMERAS SAN PABLO S.A.S en sustitución del GLP que se utiliza actualmente para cocinar.

Por otro lado, la cantidad total de biometano detectada por RSA se calcula individualmente, lo que es la idoneidad real del proyecto, considerando que el proceso es monodigestión y no co-digestión, pero al estar calculado teóricamente no es posible hallar la cantidad producida al combinar los residuos, es decir que las proporciones usadas en el método experimental no pueden ser comparadas directamente con esta estimación teórica.

Tabla 19. *Biometano teórico total generado*

Total CH₄ generado	<i>m³ CH₄</i>
<i>Total CH₄ (EB)</i>	3491,09
<i>Total CH₄ (EP)</i>	243,41
<i>Total CH₄ (RV)</i>	178,92
<i>Total CH₄ (T1*)</i>	347,91
<i>Total CH₄ (T2*)</i>	133,13
<i>Total CH₄ (T3*)</i>	202,55

*: Valores teóricos de la co-digestión para los tratamientos evaluados.

Fuente: (Autores, 2023).

Reemplazando la ecuación 8 se obtiene:

$$\text{Energía Eléctrica} = \frac{202,55 \text{ (m}^3\text{)} \times 35\% \times 0,6556 \text{ (kg/m}^3\text{)} \times 55,6 \text{ (MJ/kg)}}{3,6 \text{ (MJ/kWh)}} * 100 = 717,82 \text{ kWh}$$

De los 202,55 m³ CH₄ producidos por T3, el cual fue el tratamiento seleccionado, por medio de co-digestión anaerobia también se determinó la producción eléctrica y se obtuvo un valor de 717,82 kWh, el cual se consideró como una posibilidad para su uso en restaurantes, actividades de uso de energía en esta organización y empresas agropecuarias similares. Sin embargo, el uso específico de la energía producida durante la producción de esta planta se puede considerar complejo, debido a la implementación y la falta de conocimiento frente al tema, pero no es algo inalcanzable en esta organización, más bien es algo viable dentro de los presupuestos de esta compañía.

6.3 Objetivo específico 3.

6.3.1 Determinación de sólidos volátiles (SV) y sólidos totales (ST)

Se valoró la producción de biogás y la generación de lodos potencialmente aplicables como abono orgánico, a partir de distintas proporciones de los residuos orgánicos establecidos, mediante el uso de reactores anaerobios ex situ.

Se llevó a cabo la evaluación exhaustiva de la producción de biogás y la generación de lodos con potencial aplicación como abonos orgánicos. Este proceso se realizó utilizando reactores anaerobios ex situ, es decir, fuera del lugar de origen de los residuos orgánicos. Es por esto que uno de los objetivos

específicos fue determinar la producción de biogás de los reactores y además determinar la viabilidad de convertir los residuos orgánicos en recursos útiles y sostenibles.

Figura 16. Prototipo de biodigestor escala laboratorio.



Fuente: (Autores, 2023).

En la *Tabla 21*, se presentan los resultados de la caracterización física de los sustratos seleccionados para el desarrollo del proceso de co-digestión anaerobia. Las muestras de sustrato fueron recolectadas en la empresa PALMERAS SAN PABLO S.A.S (Estiércol bovino, porcino y residuos vegetales), usando lodo anaerobio proveniente de una planta de tratamiento de agua residual como inóculo del sistema. En cuanto a los ST en base húmeda, el estiércol bovino tuvo una concentración de 25%; el estiércol porcino tuvo una concentración de 30%, mientras que los residuos vegetales de 63%. En consecuencia, los residuos vegetales presentaron una mayor concentración frente a los otros sustratos. Esta característica puede permitir una mayor velocidad de crecimiento de las bacterias durante el proceso de co-digestión, el cual beneficia directamente la producción de biogás (Sarabia, Laines, Sosa y Escalante, 2017). El contenido de los SV es un indicador importante, ya que es considerado como el primer parámetro del potencial de los sustratos para generar biometano, al representar la concentración de biomasa presente en el sistema (Castro, Solís, Chicatto y Solís, 2019). Para este indicador, se obtuvieron valores de 16%, 19% y 61% para estiércol bovino, estiércol porcino y residuos vegetales, respectivamente.

Tabla 21. Cantidad de estiércol porcino diario.

Sustrato	ST	SV	SV/ST
<i>Estiércol bovino</i>	25%	16%	0,63

<i>Estiércol porcino</i>	30%	19%	0,63
<i>Residuos vegetales</i>	63%	61%	0,97

ST: sólidos totales, SV: sólidos volátiles

Fuente: (Autores, 2023).

Según C. Zhang et al; (2013), se informa que la materia orgánica está presente en el estiércol, de 17,1% para ST y 14,4% para SV. A partir de esto, concluyen que la adición de estiércol de vaca proporciona una mejora en la capacidad amortiguadora de los biodigestores. Esto permite mayor carga orgánica durante la digestión, aumentando así la capacidad amortiguadora en el fermentador. Estos resultados son relevantes ya que, en el contexto previamente mencionado, se destaca la relevancia de llevar a cabo una evaluación y caracterización de los residuos utilizados, en este caso, lograda a través del análisis de sólidos totales y volátiles. Estos parámetros desempeñan un papel crítico en la evaluación, control y optimización de los procesos de co-digestión anaerobia, ya que permiten cuantificar la cantidad de materia orgánica que ha experimentado degradación en el reactor o que potencialmente podría degradarse. Es esencial destacar que la diferencia entre los sólidos totales y los volátiles refleja la fracción de materia orgánica que ha sido convertida en biogás o nutrientes, lo cual tiene un impacto significativo en la eficiencia del proceso y la gestión de recursos resultantes.

La producción de biogás es de gran interés debido a su potencial como fuente de energía renovable y sostenible. El biometano, el componente principal del biogás, puede utilizarse como combustible para la generación de energía eléctrica o térmica. Además, la generación de lodos con potencial aplicación como bioabonos es importante para cerrar el ciclo de nutrientes y reducir la dependencia de fertilizantes químicos, lo que beneficia la agricultura sostenible y la gestión de residuos.

Por lo tanto, este proyecto se centró en determinar la influencia de las distintas proporciones de residuos orgánicos en la producción de biogás y en la calidad de los lodos resultantes. Esto implica la optimización de los procesos de digestión anaerobia y la gestión de subproductos para maximizar la eficiencia y minimizar los impactos ambientales.

Tabla 22. *Sólidos volátiles y sólidos totales de los lodos resultantes.*

Tratamiento	Sólidos Totales	Sólidos Volátiles	SV/ST
T1 (1.3.1)	25,01%	15,95%	0,64
T2 (3.1.1)	18,56%	10,58%	0,57
T3 (1.1.1)	20,15%	12,70%	0,63

ST: sólidos totales, SV: sólidos volátiles

Fuente: (Autores, 2023).

En la *Tabla 22*, se muestran los resultados de las propiedades físicas de los lodos producidos por el proceso de digestión anaeróbica, estas fueron muestras finales de cada reactor operando a escala laboratorio

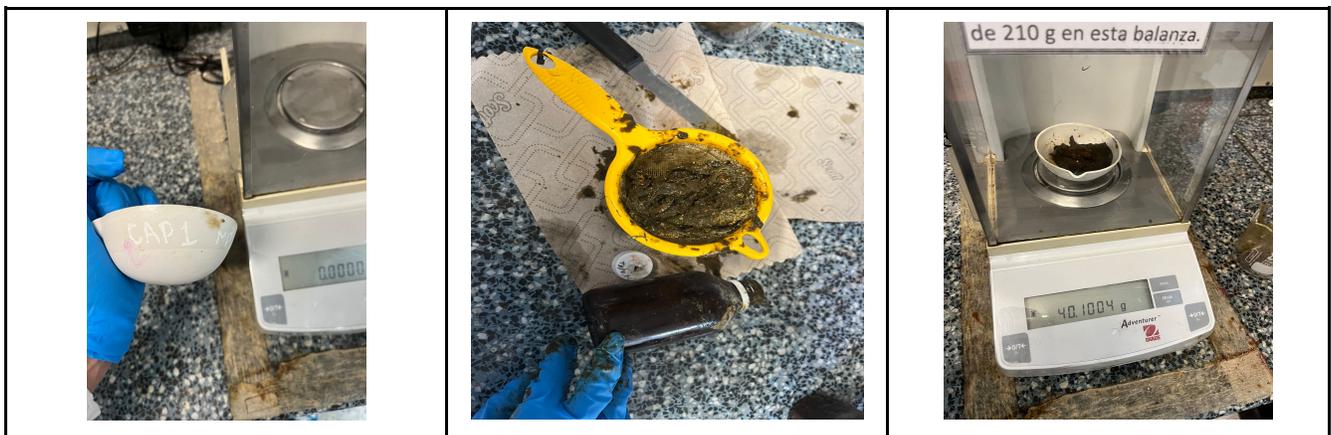
Comenzando por los ST, la concentración de T1 fue de 25,01%, mientras que las concentraciones de T2 y T3 fueron de 18,56% y 20,15%, respectivamente. Por tanto, es evidente que T1 alcanzó mejores concentraciones y mayores diferencias respecto a los demás reactores. Esto indica que el reactor operó de buena manera, como se refleja en los resultados de concentración de materia orgánica.

El contenido de SV mostró el mismo orden que ST, puesto que T1 obtuvo un porcentaje alto (15,95%) en comparación con T2 y T3, supuesto que mostraron rendimientos de 10,58% y 12,70% respectivamente. Sin embargo, para las puntuaciones SV/ST, sus resultados son similares, T1 (0,64), T2 (0,57) y T3 (0,63). Estos resultados variarán en función de la cantidad de sustrato utilizado en los mismos, ya que la producción de materia orgánica, así como de biometano y biogás, dependerá del sustrato utilizado y de su cantidad. Considerando este contexto, se puede ver en la figura 18, que aproximadamente se agregaron 14,4 g de fibras del fruto de la palma de aceite, pero la cantidad de estiércol varió en los reactores, ya que en T2 se agregó 43,2 g de EP, mientras que sólo 14,4 g de EB; en T1 se adicionó 43,2 g de EB y 14,4 g de EB, contando que en T3 se agregaron 24 g de cada sustrato. De lo anterior, son evidentes las estrechas diferencias en los resultados de ST y SV entre los tres reactores; cuanto mayor es la concentración de ST, mayor es el contenido de nutrientes, ya que son alimento de los microorganismos responsables del proceso de co-digestión anaeróbica. (Soria et al., 2001).

Además de la producción de gas biometano, la digestión anaeróbica produce residuos orgánicos con propiedades fertilizantes en los lodos resultantes (sólidos biológicos). Considerando la fracción derivada de SV/ST, estos resultados son consistentes con Barros et al. (2017) quienes caracterizaron lodos, granos y cachaza de filtración a partir de la co-digestión y obtuvieron valores inferiores a 0,7. Este valor se considera estable para uso agrícola porque evita altas concentraciones de materia orgánica en el suelo. Por tanto, se pueden utilizar lodos procedentes de sistemas de co-digestión anaerobia.

Se indica que, aproximadamente, se produjeron 47 g, 54 g y 40 g de residuo sólido en T1, T2 y T3, respectivamente, los cuales, se utilizaron para realizar la caracterización física de estos, como se puede observar en la Fig. 17. El pH y el desmontaje de los reactores se aprecian en (Anexo 20, 21)

Figura 17. *Proceso de caracterización de las propiedades físicas de los lodos resultantes.*



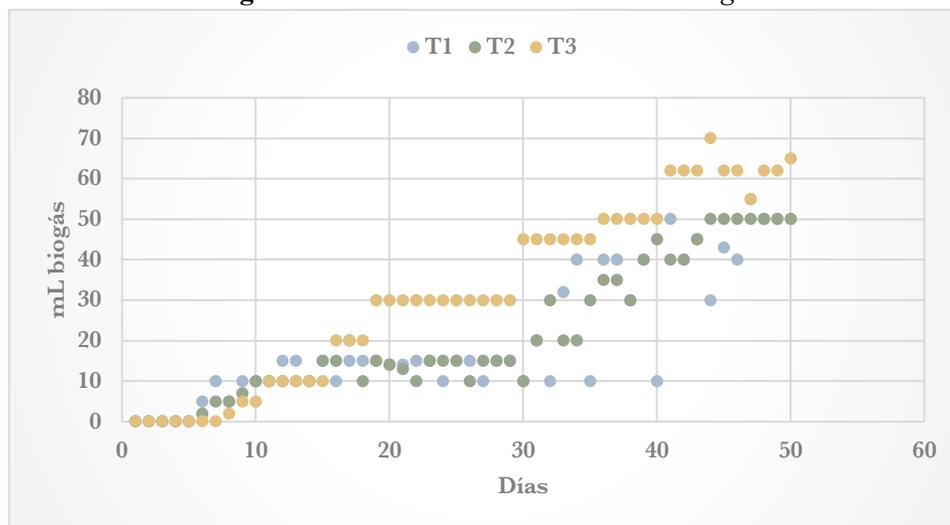
Etiquetado de cápsulas en el laboratorio	Separación de la parte acuosa de la parte líquida de los reactores	Pesaje de la cantidad sólida encontrada en cada reactor
		
Horno a 103°C por dos días y luego respectivo pesaje	Mufla por 2 horas, luego pesaje correspondiente	Lodo resultante después de pasar proceso de caracterización

Fuente: (Autores, 2023).

6.3.2. Estimación de biogás producido

En la Figura 18, se muestra la producción acumulada de biogás en los tres reactores, medida diariamente por medio de los gasómetros (Anexos 36 y 37), durante los 50 días de prueba de biodegradabilidad anaerobia en el sistema. Se evidencia que los reactores con mayor producción fueron 1 y 3, alcanzando valores máximos de 55 mL/d y 70 mL/d, respectivamente; por el contrario, la producción que alcanzó el T2 fue de 50 mL/d. Cabe resaltar que T1 tiene un volumen máximo mayor al de T2, pero este tratamiento no tiene una estabilidad en la producción del biogás.

Figura 18. Producción media diaria de biogás



Fuente: (Autores, 2023).

La producción de biogás mediante procesos de descomposición anaeróbica de sustratos orgánicos como heces y residuos vegetales se ve afectada por condiciones como la temperatura, el tipo de residuo, el tipo de animal fecal y la cantidad utilizada en el reactor. Estas condiciones determinarán la eficiencia del proceso y la producción de biogás (Vera et al., 2014).

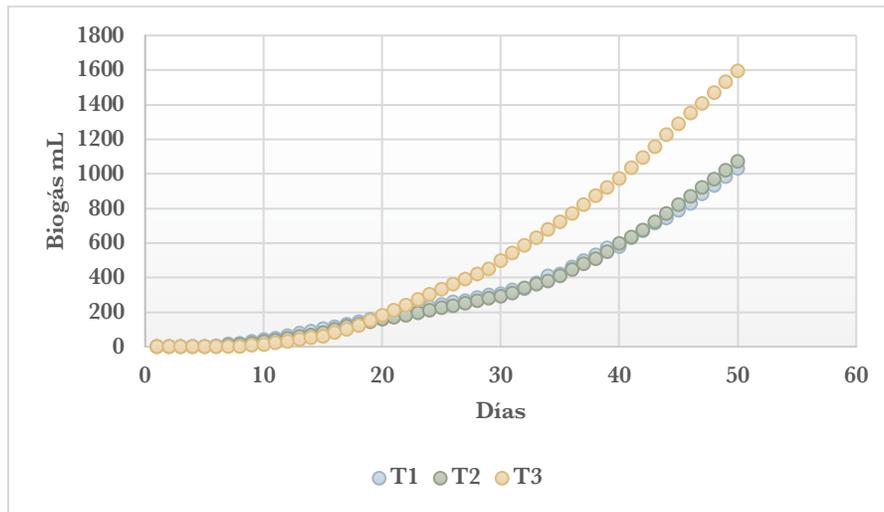
La producción de biogás aumentó significativamente a partir del día 22. Esto indica que los microorganismos necesitan más tiempo para descomponer la materia orgánica y, por lo tanto, deben ser estables en su proceso para una producción óptima de biogás. De manera similar, la Figura 18 muestra que a partir del día 30, la cantidad de producción de biogás por día aumentó, consiguiendo la concentración más alta de 70 mL/día; cabe señalar que durante estos 30 días el sistema estuvo en la fase de puesta en marcha y adaptación del microbiota asociado a la degradación. Este tiempo también depende del desarrollo de la fase de hidrólisis, que suele ser uno de los pasos limitantes del proceso cuando se trata de residuos orgánicos complejos (Arhoun, 2017; Adegunle & Okolie, 2015). Por tanto, estos valores son similares a los mostrados anteriormente, pero debido al tipo de sustrato utilizado, los valores obtenidos del biogás se ven incrementados, ya que los residuos orgánicos pueden contener más materia orgánica que el granel acuoso.

Por otro lado, Velásquez et al. (2018) tuvieron como objetivo identificar diferentes tipos de biomasa residual que pueden usarse para la producción de biogás y así evaluar su potencial de producción. Los tipos de biomasa restante se dividen en residuos ganaderos (estiércol de vacuno, estiércol de pollo y estiércol de cerdo), residuos domésticos e industriales. Respecto al estiércol, se encontró que las muestras de estiércol de vaca tuvieron los valores más bajos en comparación con el estiércol de cerdo debido a su mayor concentración de materia orgánica, pero vale aclarar que el estiércol de vaca también contiene una alta concentración de materia orgánica. pregunta. Esto se indica por el número total de sólidos y sólidos volátiles identificados en las propiedades físicas de la matriz presentada en el estudio. Los residuos orgánicos sólidos suelen tener los valores más altos para este tipo de residuos, ya que son principalmente ricos en carbohidratos, proteínas, lípidos y ácidos orgánicos. Al comparar estos residuos con la producción de biogás a partir de lodos de depuradora. Velásquez et al. (2018) indicaron que los residuos sólidos orgánicos son un sustrato adecuado para la mono degradación, aunque se recomienda aumentar el contenido de nitrógeno añadiendo fertilizantes o utilizando un inóculo adecuado (por ejemplo, lodos de depuradora) para la codegradación. Destacando que esto no se hizo en este trabajo de investigación.

En relación con la Figura 19, se puede apreciar que la concentración de biogás en los reactores T1 y T2 es bastante similar. T1 alcanza una concentración de 1033 mL, mientras que T2 registra 1071 mL. En contraste, el reactor T3 muestra una concentración de 1596 mL, la cual es superior a las concentraciones previamente mencionadas.

López & Ruiz (2014) realizaron la cuantificación de la producción de biogás que resultó a partir de un reactor de pequeña escala de laboratorio, usando como sustrato, estiércol de vaca y agua a granel, con base en datos de volumen acumulado diario. En este estudio, la producción de biogás más alta fue de 363 mL (0,363 L) y la más baja fue de 194 mL (0,194 L). En donde, según los datos obtenidos, se logró tener una mayor cantidad de biogás que el autor, esto puede deberse a la cantidad de sustrato y a que en este caso se evaluó la co-digestión anaerobia de estos residuos y no la DA de estos.

Figura 19. Concentración de biogás en cada reactor.



Fuente: (Autores, 2023).

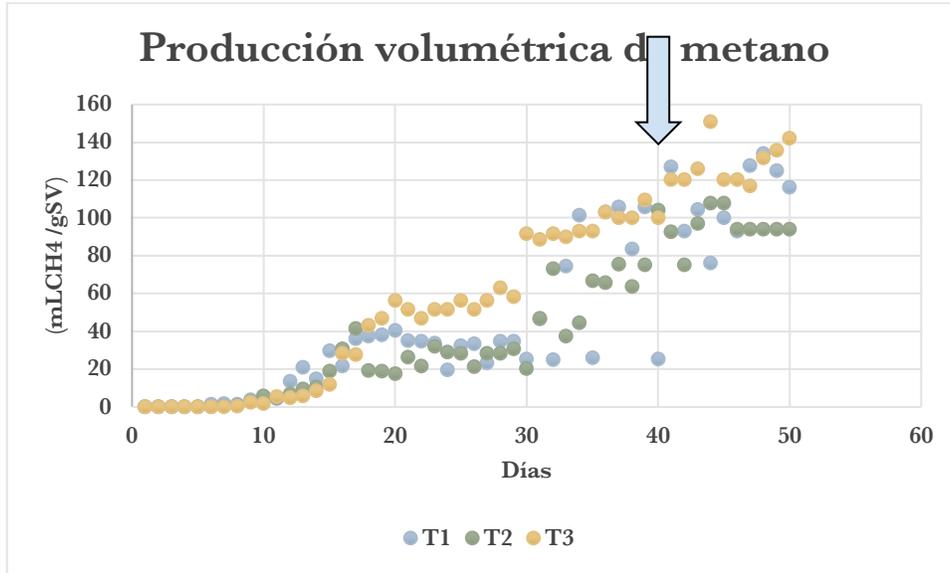
Considerando la figura anterior y de acuerdo con la proporción de residuos vegetales, estiércol bovino y estiércol agregados a T1 y T2 (Tabla 8), el proceso de co-digestión de T2 claramente tiene mejor desempeño porque la cantidad de estiércol porcino agregado es mayor que la de T1. Por otra parte, está el reactor (T3), el cual obtuvo una mayor producción de biogás, y tiene las mismas proporciones en términos de proporciones de los residuos. Por lo tanto, considerando la disponibilidad y cantidad de residuos orgánicos agropecuarios que genera la finca, esta opción sería la opción más viable.

Asimismo, se realizó esta cuantificación, por medio del desplazamiento de una columna de agua (Gasómetro), en donde el biogás acumulado desde el 7 de agosto del 2023 al 15 de octubre del mismo año, en donde el reactor (T2) y el reactor (T3) tuvieron un desplazamiento de 1071 y 1596 mL (Anexo 40-43). Esto resulta en una gran diferencia con lo obtenido anteriormente, esto debido a que la temperatura en este caso fue regulada aproximadamente a 30°C (Anexo 38).

6.3.3. Selección de proceso de codigestión de mejor desempeño

Para determinar el proceso más eficiente en términos de producción de biometano, se realizó un análisis estadístico, para lo cual se tuvo en cuenta el inicio del período de estabilidad de la operación, determinado por el coeficiente de variación (CV). El análisis gráfico de la producción diaria de biometano (*Figura 20*), ayuda a identificar el comienzo del período de estabilidad operativa donde está claro que la producción de biometano de cada reactor tiende a ser estable, con excepción del reactor (T1).

Figura 20. Producción diaria de biometano (mL/d) durante el periodo operacional. La flecha indica el inicio del periodo de estabilidad operacional (C.V < 30%): T1=30,63%, T2=9,48%, T3=10,98%.



Fuente: (Autores, 2023).

En la *Tabla 23* se muestran los valores de C.V determinados durante todo el período de operación (50 días) y los últimos 7 días de operación, mostrando que el C.V para los dos de los tres reactores es menor al 10%. Estos datos fueron seleccionados para inferencia estadística.

Para algunos investigadores, CV define la calidad de un experimento porque se utiliza tradicionalmente para determinar si un diseño es confiable. Según Gordon y Camargo (2015), el CV varía con las condiciones experimentales; los autores afirman que las áreas superiores al 30% deben descartarse ya que representan la precisión más baja lograda. Por lo tanto, en la *Tabla 23* se observa que los CV en el reactor operando durante 50 días alcanzaron porcentajes superiores al 30%, por lo que se determinó que entre los días 40 y 50 el sistema alcanzó mayor estabilidad, por lo que como se muestra en la *Figura 23*, en este caso el valor de CV está entre 9.40 - 30.00%, que permanece dentro de un rango aceptable, aclarando que el reactor (T1) no obtuvo un valor de CV menor a 30, por lo que no está dentro de un rango admisible según esta técnica estadística.

c. Tabla 23. Coeficiente de variación de cada reactor en diferente periodo.

Periodo	Tratamiento 1 (T1)	Tratamiento 2 (T2)	Tratamiento 3 (T3)
Periodo operacional (0-50 días)	89,82%	87,93%	78,93%
Periodo de estabilidad (40-50 días)	30,63%	9,48%	10,98%

Fuente: (Autores, 2023).

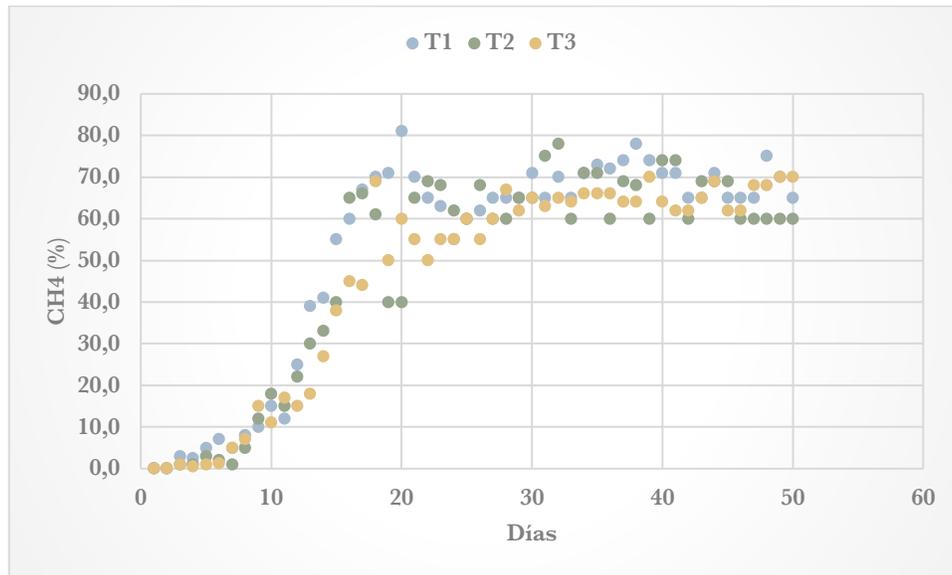
Como se muestra en la Figura 21, los tres reactores operados a escala laboratorio mostraron un comportamiento similar en términos de curvas de producción de biometano. Sin embargo, el rendimiento de los reactores T2 y T3 fue de aproximadamente 47% y el rendimiento de T1 fue de 52,15%. Estos datos indican que la relaciones RV/EB/EB planteadas, tienen una optimalidad similar. Lo anterior indica que la codigestión estimula la generación de gas biometano, al presentar proporciones más equitativas de cada uno de los residuos, pero esto depende del tipo de sustrato y la relación C/N que cada uno de estos posee.

Los resultados obtenidos se correlacionan con los datos indicados en el estudio de Zhang (2013), el cual trabajó con estiércol bovino y residuos de comida. En este estudio, se estableció que una proporción similar de RV y EB estimula la producción de biogás. En consecuencia, al reducir dicha proporción se obtuvieron mayores niveles de biogás de hasta 570 mL CH_4 /gSV, trabajando con una relación de RV/EB de 2. Al aumentar la relación a 4, dicho rendimiento fue aproximadamente 20% inferior. Datos similares fueron obtenidos por Mazareli (2016), trabajando con estiércol de cerdo y residuos vegetales en un proceso continuo, donde el equilibrio de la cantidad de residuos en codigestión posibilitó obtener mayores niveles de biogás. Comparado con el rendimiento obtenido en este estudio, el cual fue de 150 mL CH_4 /gSV, se observa una gran diferencia entre lo presentado por los autores, esto debido a diversas posibles condiciones.

Al realizar una comparación entre rendimiento experimental, frente con el rendimiento teórico, en los cuales se alcanzaron rendimientos de 150,94 mL CO_4 /gSV y de 389,61 mL CO_4 /gSV, respectivamente; se logra un 38,74% del rendimiento teórico, lo cual significa que el rendimiento experimental fue bajo con respecto al rendimiento teórico, lo cual puede ser atribuible a una serie de factores que incluyen la composición y calidad del sustrato, las condiciones de operación del digestor anaerobio, el tiempo de retención hidráulica, factores ambientales y limitaciones técnicas. Para realizar mejoras en la producción de metano, es de suma importancia llevar a cabo una evaluación exhaustiva del sistema de co-digestión anaerobia y considerar ajustes en función de los hallazgos.

La Figura 21 muestra la concentración de biometano en los tres reactores calculada utilizando el sensor Arduino durante la operación (50 días). La concentración comenzó a aumentar el día 10 y se mantuvo estable desde el día 20 hasta el final de la operación.

Figura 21. Concentración de biometano en los tres reactores.



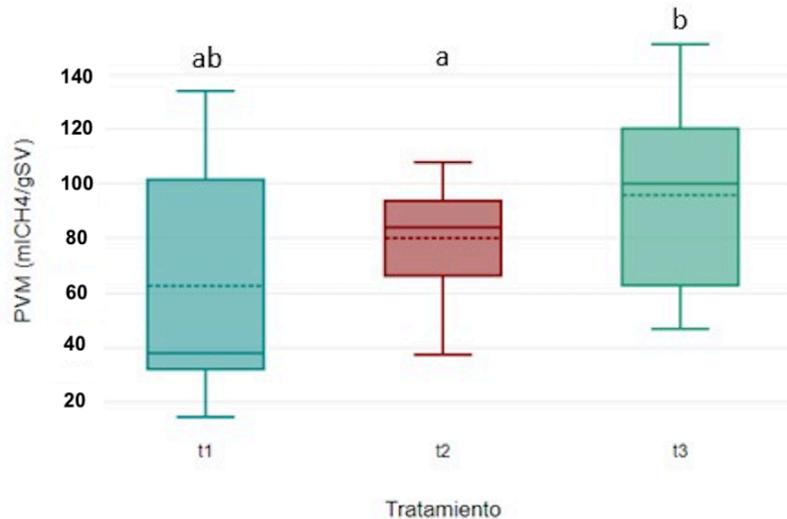
Fuente: (Autores, 2023).

Como se muestra en la *Figura 21*, los valores máximos de T1, T2 y T3 en el sistema de co-digestión implementado en términos de concentración de biometano fueron 81%, 78% y 70%, respectivamente. Estos valores son típicos de los sistemas de digestión anaeróbica e indican que el proceso puede producir altas concentraciones de biometano (Q. Zhang et al., 2016). Los perfiles de concentración obtenidos son similares a otros estudios que utilizan procesos de monodigestión (Botello et al., 2018; Duda et al., 2015) y co-digestión anaeróbica (Dareioti et al., 2009; Mazareli et al., 2016).

Mazarela et al. (2016) alcanzaron entre el 75% y el 80% del valor de concentración en estado estacionario utilizando desechos con características similares a los utilizados en este estudio y alcanzaron este valor el día 4 de operación. La diferencia en el período de estabilidad que se aplica al trabajo actual se debe a diferentes variables del entorno, una de estas es la temperatura de funcionamiento utilizada en el estudio fue de 35 °C, la cual fue registrada por el sistema Arduino.

Con el fin de confirmar si las proporciones evaluadas variaron significativamente, fue realizado un análisis de varianza (ANOVA) seguido de una prueba de Tukey ($p < 0,05$). La Fig. 22 muestra un boxplot con los datos analizados durante el periodo de estabilidad operacional ($CV < 30\%$). (Anexo 46). Como se observa, los tratamientos T1 y T3 tienen diferencia estadística con respecto a T2, aunque entre T1 y T3 no hay diferencia estadística.

Figura 22. Boxplot de la producción volumétrica de metano (PVM) obtenida para los tratamientos. T1= 1:2:1; T2=3:1:1 y T3= 1:1:1. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p < 0,05$).



Fuente: (Autores, 2023).

En la *Figura 22*, se logra observar que los reactores con mayor producción fueron T2 y T3, con una producción muy semejante entre estos, en comparación con T1. Aunque, los reactores T2 y T3 presentan menos valores mínimos y máximos que T1, con un rango de $0,37-1,10 \text{ CH}_4 / \text{gSV}$, $0,45-1,45 \text{ CH}_4 / \text{gSV}$ y $0,18-0,34 \text{ CH}_4 / \text{gSV}$, respectivamente. Los datos presentaron una distribución normal según la prueba realizada de Tuckey (Anexo 49), pues se observa que, por el ancho de la caja, los datos no tuvieron variación significativa debido al $CV < 30\%$ durante el periodo de estabilidad.

Concorde a lo anterior, T1 y T3 son considerados como la mejor opción para el aprovechamiento energético, debido a su simetría y baja diferencia significativa entre estos; no obstante, es pertinente seleccionar el reactor 3 (T3) debido a la cantidad de estiércol y residuos vegetales empleados para su aprovechamiento, teniendo en cuenta la disponibilidad de los mismos y su relación equitativa, (1.1.1), que estimuló la generación de biometano, asimismo, se observa que tiene una mayor máximo y un menor mínimo, con respecto a los otros dos tratamientos, pudiendo tener rendimientos más altos, concorde a lo desarrollado y contrastado en este trabajo y el análisis estadístico.

6.3.4. Estimación energética

Para estimar el potencial energético de un proceso con un rendimiento óptimo, es necesario calcular la producción acumulada de biogás con base en los datos de cantidad de biogás obtenidos durante la operación del sistema; mediante la metodología mencionada en (López y Ruiz, 2014), la cual, se muestra a continuación:

$$\text{Rendimiento biogás a temperatura } 30^{\circ}\text{C (T3)} = \frac{1596 \text{ mL}}{19,1 \text{ g SV EB} + 19,1 \text{ g SV EP} + 14,9 \text{ g SV RV}} = 30,05$$

Según Yao et al (2020), La codigestión anaerobia, en condiciones de baja temperatura resulta en una menor producción de biometano y una estabilidad reducida. Esta afirmación se puede comprobar con los datos obtenidos en la Figura 20, donde se evidencia que el tiempo de inicio para la generación de biometano fue más prolongado debido a la disminución de la tasa metabólica de microorganismos. Por su parte, Álvarez y Lidén (2009), llevaron a cabo una investigación de la codigestión anaerobia en bajas temperaturas con una mezcla de sustratos de estiércol de llama, vaca y oveja. Donde obtuvieron un rendimiento de biometano de $0,07 - 0,14 \text{ m}^3/\text{kg SV}$, con una concentración de biometano de 47–55%. Con relación a este trabajo, T1, T2 y T3 en el periodo de estabilidad obtuvieron una concentración promedio de 68%, 64% y 67% de biometano, respectivamente; además, en este caso se obtuvo un rendimiento mayor que el del autor citado, ya que se obtuvo un rendimiento de biometano de $0,15 \text{ m}^3/\text{kg SV}$. Por lo que, se logra evidenciar que estas concentraciones fueron superiores a la determinada por los autores anteriormente mencionados, por lo cual, se puede inferir que este valor varía dependiendo de la cantidad y tipo de sustratos empleados en los reactores (Yao et al., 2020).

Cuando la temperatura ambiente es inferior a 20°C , los procesos de digestión son más lentos en los reactores en funcionamiento, lo que resulta en la acumulación de sólidos digeridos, como se ve en los resultados presentados en las ecuaciones anteriores. Por lo tanto, estos sistemas no son las opciones más atractivas para el tratamiento y eliminación del estiércol; A pesar de las diferentes condiciones climáticas en el área de investigación de este trabajo, de los resultados obtenidos se desprende claramente que, dada la cantidad de agua suministrada al reactor, una proporción adecuada de sustratos puede producir biogás y biometano en determinadas condiciones. Debido a las características climáticas, la temperatura afecta significativamente el crecimiento microbiano y la actividad enzimática (Yao et al., 2020). Por lo tanto, se considera que uno de los factores limitantes en la aplicación de este sistema son las condiciones de temperatura de la zona, seguido de la relación C/N, el tiempo de retención hidráulica y la probabilidad orgánica.

Tabla 23. Datos obtenidos del sistema de codigestión anaerobia y su estimación energética.

Reactor	m^3/gSV	Producción metano (mL * CH_4 /gSV)	Biogás total (mL)	Matano total (m^3)	EE* (kWh)	ET* (kWh)
T1	893916,5	133,93	1033	119,72	424,28	606,11
T2	348874,17	107,81	1071	37,61	133,30	190,42
T3	519890,5	150,94	1596	78,47	278,09	397,27

* ET (Energía térmica) y EE (Energía eléctrica).

Fuente: (Autores, 2023).

Considerando los valores de la *Tabla 23*, se obtiene que los prototipos implementados generaron un volumen aproximado de 1000 mL de biogás durante el periodo operacional. Realizando una estimativa para generar 1 m³ de biogás, el cual genere 7 kWh de energía eléctrica (FAO, 2011), y pueda ser implementado para el desarrollo de actividades asociadas a la cocción de alimentos y uso de energía en la empresa PALMERAS SAN PABLO S.A.S. Según este promedio, a escala laboratorio, se realizó una proyección con los residuos totales al mes, los cuales se acercan a las 100 toneladas/mes, teniendo en cuenta las relaciones usadas en el laboratorio, por lo que, para producir 7 kWh se necesitaría una cantidad aproximada de 1 día de recolección de estiércol bovino, porcino y residuos vegetales. En ese sentido, dada la disponibilidad de residuos estimada en el presente estudio, es necesario estudiar la posibilidad de evaluar el desempeño de un sistema semicontinuo, y contar con un reservorio de biogás. Es importante resaltar, que, con la totalidad de residuos al mes, aprox. 100685 kg/mes, teniendo en cuenta las proporciones de T3 se generan (278,09 kWh), una cantidad de energía que puede ser aprovechada para esta empresa esto calculado de la siguiente manera:

Reemplazando la ecuación 8 se obtiene:

$$\text{Energía Eléctrica} = \frac{0,7847 \text{ (m}^3\text{)} \times 35\% \times 0,6556 \text{ (kg/m}^3\text{)} \times 55,6 \text{ (MJ/kg)}}{3,6 \text{ (MJ/kWh)}} * 100 = 278,09 \text{ kWh}$$

Con base en los resultados obtenidos en el artículo, queda claro que la producción de biogás no es suficiente para asegurar las actividades energéticas totales en el área de estudio. Sin embargo, los pequeños sistemas de digestión anaerobia pueden proporcionar suficiente energía térmica para sustentar algunas operaciones de GLP (estufas) e incluso iluminación (FAO, 2011), dependiendo de ciertas variables como el tipo de sistema de demanda energética, temperatura, tipo de sustrato utilizado, necesidades energéticas de los usuarios, entre otros.

Realizando una comparación datos obtenidos teóricamente y los datos calculados según los resultados obtenidos experimentalmente, se presentó una diferencia mayor a los 440 kWh, ya que teóricamente la estimación dio como resultado una energía de 717,82 kWh, mientras que obtuvieron 278,09 kWh, teniendo en cuenta que la eficiencia energética del 100% no se logra en un proceso de co-digestión anaerobia debido a ciertos factores intrínsecos y extrínsecos que influyen en la conversión de sustratos orgánicos en biogás y energía utilizable, como los son las pérdidas de energía durante la conversión, ineficiencias inherentes en el proceso, variabilidad en la composición de los sustratos, así como pérdidas de energía durante la purificación del biogás. A pesar de estas limitaciones, la co-digestión anaerobia sigue siendo una opción valiosa para la generación de energía renovable y el tratamiento de residuos orgánicos.

Los consumos de energía eléctrica de la empresa (Anexo 48), indican que en los últimos seis meses, comprendidos desde el mes actual, hubo un consumo promedio de 357 kWh, es decir que si se implementará este sistema de producción energética se podría saldar el 78% de la energía eléctrica consumida en esta organización, excluyendo el consumo de GLP que está realiza.

El principal uso del biogás doméstico es en el área de la cocina, ya que la eficiencia de calentamiento del biogás en estufas es del 50% y no requiere ningún proceso de purificación (Tilley et al., 2020). Además, dados sus beneficios sociales, económicos y ambientales, es una de las alternativas ampliamente aceptadas en las zonas rurales ya que reemplaza combustibles tradicionales como la leña (las pastillas afectan principalmente a los pulmones) y el gas propano (ahorro de combustible). en pipetas de gas);

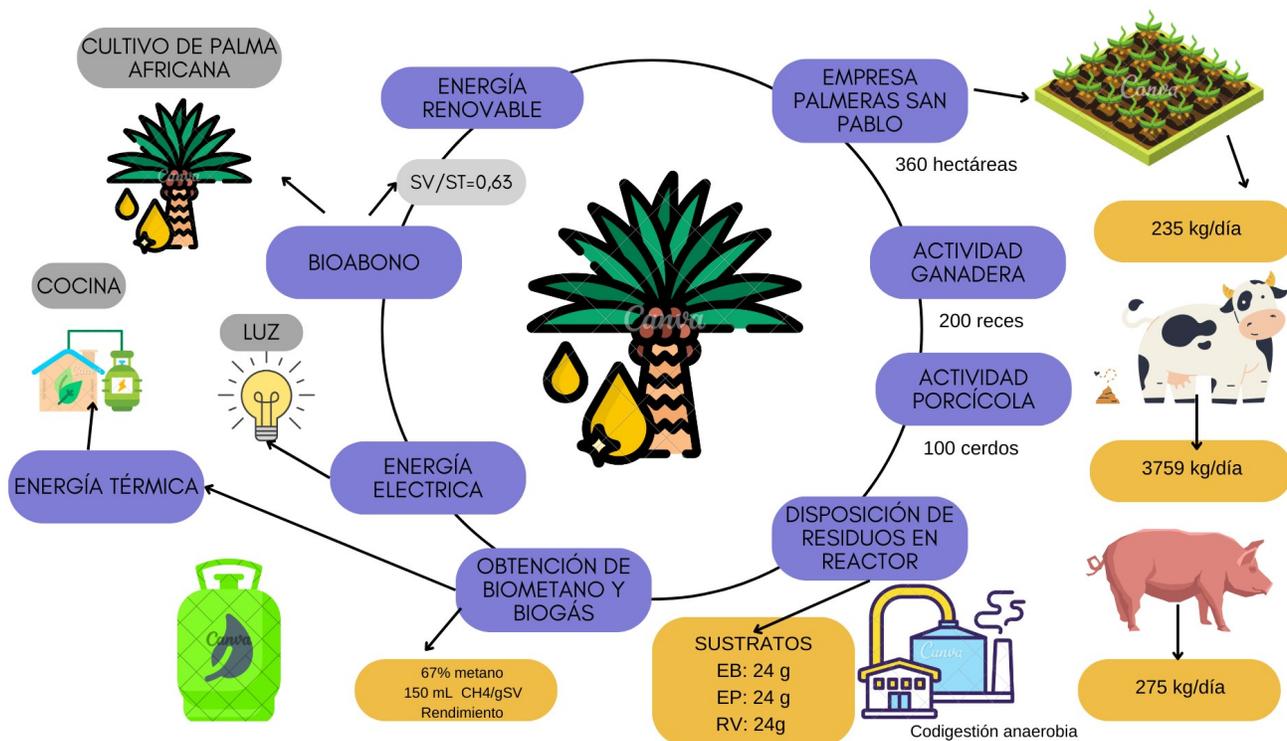
además, integran nuevamente los residuos orgánicos al ciclo productivo y previenen su disposición inadecuada y la transmisión de vectores (Escobedo, 2011).

Otra alternativa al uso de biogás es el biofertilizante, el cual se obtiene de la fermentación en procesos de digestión anaeróbica (Navarro, 2017). Siempre que la materia prima suministrada tenga un alto contenido de nutrientes, se puede utilizar como acondicionador del suelo o fertilizante (FAO, 2011). Este fertilizante se puede utilizar en el cultivo de la empresa y en las pasturas del ganado (Anexo 3, 4 y 5) o en cultivos de su alrededor para obtener beneficios económicos y ambientales, ya que es una práctica agrícola más natural y sustentable que mejora las condiciones del suelo y de la misma manera produce alimentos para sí mismo - Cumplimiento (Navarro, 2017).

Se da por tanto el caso de que este trabajo contribuya a la producción de energía renovable, la cual está disponible principalmente para la población de las zonas rurales y para incentivar a empresas relacionadas con estas actividades económicas a producir este tipo de energías, teniendo en cuenta las condiciones mencionadas en este apartado. Este objetivo energético es una economía circular, ya que los residuos domésticos de las fábricas se reintegran a su capacidad de producción, al igual que el estiércol de vaca, que es uno de los principales contribuyentes a los gases de efecto invernadero y a los grandes volúmenes de residuos generados por las grandes actividades económicas en la empresa.

Esta tecnología cuenta con un alto potencial para la economía circular puesto que genera reducción de la dependencia energética, promueve la circularidad de los residuos orgánicos y aumenta la economía interna.

Figura 23. Análisis ciclo de vida de los residuos en la empresa “PALMERAS SAN PABLO S.A.S”.



Fuente: (Autores, 2023).

7. Conclusiones

Considerando los resultados de este estudio, la disponibilidad de sustratos de estiércol bovino, estiércol porcino y residuo vegetal en la empresa “PALMERAS SAN PABLO S.A.S” no sólo es práctica para su uso en procesos de co-digestión anaeróbica, sino que también es adecuada para las actividades que se realizan en la empresa, además que se asegura la disponibilidad. Los estudios realizados abordan las propiedades fisicoquímicas, en particular la cantidad de materia orgánica requerida para la descomposición y procesos eficientes en la operación del sistema. Por lo tanto, la relación de sustrato se debe utilizar teniendo en cuenta la relación determinada, ya que de ello depende un rendimiento de biogás bueno y constante en el proceso.

En este trabajo se utilizaron 3 diferentes relaciones de RV/EB/EP, en términos de sólidos volátiles, para los reactores que presentaron mejores rendimientos. Para T1 se implementó una relación de 1/3/1 y para T2 se empleó una relación 3/1/1 y en T3 se emplea una relación de 1. Estas relaciones se produjeron a partir de la cantidad de sustratos implementados. Por otra parte, la temperatura constituye uno de los parámetros más importantes para el desarrollo de la codigestión anaeróbica, puesto que, en temperaturas más bajas, la operación tiende a ser más lenta y menos eficiente. No obstante, a pesar de que en el presente estudio se trabajó a temperatura promedio de 30°C, dada por las condiciones propias de la zona, se obtuvo una alta concentración de biometano en el biogás producido (de hasta 71%), concentración mayor a lo especulado inicialmente (>60%).

La diferencia entre los datos obtenidos teóricamente y los datos experimentales fue mayor a los 440 kWh, ya que teóricamente la estimación dio como resultado una energía de 717,82 kWh, mientras que obtuvieron 278,09 kWh, teniendo en cuenta que la eficiencia energética del 100% no se logra en un proceso de co-digestión anaerobia debido a ciertos factores intrínsecos y extrínsecos que influyen en la conversión de sustratos orgánicos en biogás y energía utilizable, como los son las pérdidas de energía durante la conversión, ineficiencias inherentes en el proceso, variabilidad en la composición de los sustratos, así como pérdidas de energía durante la purificación del biogás. A pesar de estas limitaciones, la co-digestión anaerobia sigue siendo una opción valiosa para la generación de energía renovable y el tratamiento de residuos orgánicos.

La co-digestión anaerobia puede tener el potencial para ser implementada a escala piloto en la empresa, teniendo claras las condiciones óptimas para un buen rendimiento. Con base en los resultados del análisis, se determinó que para su posible implementación es necesaria una evaluación detallada del funcionamiento del reactor y de las condiciones fisicoquímicas. También se consideró la posibilidad de utilizar lodos digeridos debido a que tienen un índice SV/ST de 0,68 y pueden utilizarse como fertilizante (SV/ST<0,7).

Los beneficios evaluados incluyen el aspecto ecológico, la reducción indirecta de las emisiones de gases de efecto invernadero, la reducción de la posible propagación de vectores de enfermedades, la eliminación de costos de tratamiento de RSA, reducción de costos en los restaurantes al usar menos GLP (gas licuado de petróleo); y el aspecto social, el reconocimiento del nombre de la empresa. Adecuada gestión sostenible de los procesos productivos no directamente relacionados; en términos económicos, incluida la producción de energía (generación de metano o electricidad según sea necesario), la

producción de biofertilizantes, la reducción del costo de la energía y la posible independencia energética en ciertos procesos en los países de latinoamérica.

Al realizar una comparación entre rendimiento experimental, frente con el rendimiento teórico, en los cuales se alcanzaron rendimientos de 150,94 mL CO_4 /gSV y de 389,61 mL CO_4 /gSV, respectivamente; se logra un 38,74% del rendimiento teórico, lo cual significa que el rendimiento experimental fue bajo con respecto al rendimiento teórico, lo cual puede ser atribuible a una serie de factores que incluyen la composición y calidad del sustrato, las condiciones de operación del digestor anaerobio, el tiempo de retención hidráulica, factores ambientales y limitaciones técnicas. Para realizar mejoras en la producción de metano, es de suma importancia llevar a cabo una evaluación exhaustiva del sistema de co-digestión anaerobia y considerar ajustes en función de los hallazgos.

La recolección de energía del estiércol en animales en pastoreo presenta desafíos significativos debido a la dispersión de los desechos en un área extensa. La movilidad de los animales complica la recopilación eficiente de los residuos, lo que puede hacer que la implementación de biodigestores en este contexto sea más compleja. Se requerirían estrategias innovadoras para la gestión eficiente de los desechos y la recolección de biogás en un entorno de pastoreo.

La implementación de biodigestores en la empresa dependerá de la capacidad para abordar los desafíos asociados con la recolección de desechos en animales en pastoreo. Si bien puede requerir inversiones adicionales en sistemas de gestión y recolección, el aporte nutricional de la orina de cerdos estabulados podría compensar estos desafíos, haciendo viable la implementación de biodigestores.

Aunque el rendimiento obtenido fue del 39% del teórico con las estimaciones realizadas, se estima que se solventaría el 78% de la energía consumida actual, esto traducido en factor económico, se presentaría un ahorro mensual de aproximadamente \$ 205.000,00 pesos colombianos. Como este tipo de inversiones son a largo tiempo, al año se ahorran alrededor de \$ 2.500.000,00, sin tener en cuenta la intermitencia que presenta el servicio actual de energía en esta organización, y dejando a un lado el ahorro paralelo que se puede obtener al reemplazar el GLP usado en las cocinas.

La economía circular como un nuevo enfoque en diversos aspectos de la economía y el entendimiento de que la gestión de residuos y su uso juega un papel clave en los desafíos, metas y objetivos del desarrollo sostenible. Se necesita construir un nuevo paradigma que considere los residuos como un recurso. A medida que la sociedad se desarrolla, aumenta la necesidad de energía. Actualmente existe una gran preocupación por el uso de fuentes de energía tradicionales, ya que no son renovables y se derivan de recursos naturales, lo que genera muchos impactos negativos en el medio ambiente y la sociedad. De este modo, la introducción de alternativas como la co-digestión anaeróbica puede lograr una transición de una economía de consumo a una economía circular, añadiendo valor a los residuos que normalmente se eliminarían y ofreciendo un alto potencial de aprovechamiento, lo que garantizará la sostenibilidad de estas nuevas tecnologías.

8. Recomendaciones

Proporcionar información sobre la separación, reutilización, técnicas de recuperación, impactos ambientales negativos y otros temas relacionados para que los habitantes del área de estudio puedan participar activamente en el manejo adecuado de los residuos y tengan conocimientos claros sobre su manejo, para ello se recomienda capacitar a la población, que haga parte del área de estudio en temas ambientales.

Promover técnicas de aprovechamiento que puedan ser implementadas en las empresas dedicadas a estas actividades, con el fin de reducir el volumen de residuos dispuestos de forma inadecuada.

Hacer caracterización de los lodos resultantes, con mayor número de análisis, físicos y químicos, debido a que lo que se realizó no es suficiente para determinar su uso como abono verde en esta actividad agrícola.

Se recomienda ajustar la relación C/N de los reactores, añadiendo fertilizantes o utilizando un inóculo adecuado, puede ser el uso de lodos de depuradora, para optimizar el proceso de co-digestión, es decir hacerlo más efectivo.

Evaluar las proporciones obtenidas empleando sistemas en régimen semicontinuo. Asimismo, también se recomienda estudiar otras relaciones, aparte de las propuestas, que sean próximas al óptimo obtenido en este estudio, y verificar la relación C/N, a fin de determinar la composición exacta de los residuos generados, la cual permita establecer condiciones específicas que posibiliten un eventual escalado del proceso.

Para lograr una evaluación completa de la efectividad de la co-digestión anaerobia, es crucial llevar a cabo un análisis comparativo con la monodigestión. Este enfoque permite determinar con precisión el rendimiento del proceso y su viabilidad en términos de eficiencia de conversión de sustratos en biogás y otros productos útiles. Se recomienda encarecidamente realizar experimentos a nivel de monodigestión para establecer una línea base de referencia y luego comparar los resultados con los obtenidos a través de la co-digestión. Esto proporcionará una comprensión clara de las mejoras o desafíos adicionales que surgen como resultado de la co-digestión anaerobia.

Es recomendable realizar pruebas experimentales adicionales basadas en estos datos variando las condiciones operativas, como la temperatura y las variables de optimización, como el tratamiento previo, antes de agregar residuos para determinar las condiciones óptimas de funcionamiento y rendimiento, con la finalidad de obtener eficientemente la producción de gas metano. Asimismo, hay que tener en cuenta que no se encontraron estudios que hayan realizado algo igual a lo realizado en esta investigación, por lo que es recomendable realizar mayor número de investigaciones encaminadas como lo fue este proyecto.

Además, se recomienda realizar un monitoreo más riguroso de las variables operacionales tales como ácidos volátiles totales, pH, concentración de materia orgánica, alcalinidad, entre otros, con el fin de garantizar un mejor desempeño de crecimiento de los microorganismos, por ende, mejorar la eficiencia de producción del biometano.

Es crucial realizar un análisis detallado de la factibilidad económica y técnica de la implementación de biodigestores en la empresa, considerando la complejidad de la recolección de desechos en animales en

pastoreo. Investigaciones adicionales podrían centrarse en estrategias específicas para superar los desafíos logísticos y en la optimización de la gestión de residuos para maximizar la producción de biogás.

Algunas estrategias a tener en cuenta para mejorar el rendimiento de biogás en los reactores pueden ser tener un control sobre los sustratos utilizados y que estos tengan una relación óptima de carbono/nitrógeno, de igual manera ajustar el pH del reactor debido a que este se debe encontrar en un rango de 6.5 a 7.5 para que la actividad bacteriana se realice de forma correcta, asimismo, hay que realizar un seguimiento minucioso, puesto que estas bacterias deben estar expuestas a una temperatura óptima para su crecimiento (35° C a 40° C), además, se debe llevar a cabo una correcta agitación de los reactores, ya que es fundamental para garantizar una codigestión eficiente.

9. Referencias Bibliográficas

- Achinas, S., & Euverink, G. J. W. (2016). Theoretical analysis of biogas potential prediction from agricultural waste. *Resource-Efficient Technologies*, 2(3), 143-147.
- Adekunle, K., & Okolie, J. (2015). A Review of Biochemical Process of Anaerobic Digestion. *Advances in Bioscience and Biotechnology*, 06(03), 205–212. <https://doi.org/10.4236/abb.2015.63020>
- Aarons S.R., Ó Connor C.R., Gourley C.J.P. Dung Decomposition in Temperate Dairy Pastures I. Changes in Soil Chemical Properties. *Australian Journal of Soil Research*, volumen 42, 2004: 107-114.
- Aguilera Peña, A. T., Gómez Álzate, C. M., & Gutiérrez Rosas, M. D. (2015). Conozcamos lo mejor de la flora y fauna de la región del Ariari en el municipio de Granada, departamento del Meta. “Catarsis turística”.
- Aponte, I., & Velez, J. (2019). Evaluación técnica y financiera del uso de un biorreactor anaerobio para el tratamiento de los residuos sólidos orgánicos generados en Campo Rubiales como modelo de estandarización. [http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7444/1/1016084787-2019-1-IP .pdf](http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7444/1/1016084787-2019-1-IP.pdf)
- Arenas, B. (2019). Propuesta para el diseño de un biodigestor anaerobio como sistema de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos, generados en las viviendas del proyecto “La Villa Solar” ubicado en la ciudad de Buenaventura-Colombia. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/1128
- Arhoun, B. (2017). Tesis doctoral digestión y codigestión anaerobia de residuos agrícolas, ganaderos y lodos de depuradora. <http://orcid.org/0000-0003-2263-0639>
- Arrieta Palacios, W. J. O. (2016). Diseño de un biodigestor doméstico para el aprovechamiento energético del estiércol de ganado.
- Badii, M., Guillen, A., & Abreu, J. (2016). Energías Renovables y Conservación de Energía (Renewable Energies and Energy Conservation). In *Daena: International Journal of Good Conscience* (Vol. 11, Issue 1). [http://www.spentamexico.org/v11-n1/A12.11\(1\)141-155.pdf](http://www.spentamexico.org/v11-n1/A12.11(1)141-155.pdf)
- Barros, V., Duda, R., Vantini, J., Omori, W., Ferro, M., & Oliveira, R. (2017). Improved methane production from sugarcane vinasse with filter cake in thermophilic UASB reactors,

- with predominance of Methanothermobacter and Methanosarcina archaea and Thermotogae bacteria. *Bioresource Technology*, 244, 371–381. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.106>
- bdullah, L. C., Wong, L. L., Saari, M., Salmiaton, A., & Abdul Rashid, M. S. (2007). Particulate matter dispersion and haze occurrence potential studies at a local palm oil mill. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 4, 271-278
 - Botello, W., Vantini, J., Duda, R., Giachetto, P., Cintra, L., Tiraboschi, M., & de Oliveira, R. (2018). Predominance of syntrophic bacteria, Methanosaeta and Methanoculleus in a twostage up-flow anaerobic sludge blanket reactor treating coffee processing wastewater at high organic loading rate. *Bioresource Technology*, 268, 158–168. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.06.091>
 - Briceño Vargas, L. F., & Delgadillo González, K. D. (2021). Codigestión anaerobia para el aprovechamiento energético de los residuos orgánicos generados en la finca “Las Huertas”, vereda “El Hatillo”(Guatavita, Cundinamarca).
 - Calvo, R., Álamos, N., Billi, M., Urquiza, A., & Contreras Lisperguer, R. (2021). Desarrollo de indicadores de pobreza energética en América Latina y el Caribe.
 - Caceres Jurado, J. (2021). Evaluación de la producción de energía renovable a partir de residuos orgánicos de ganado vacuno y porcino en el centro de beneficio frigorífico Manu EIRL de Puerto Maldonado en Madre de Dios 2016.
 - Castañeda Cardona, J. S. (2019). Panorama de las Energías Renovables y Análisis del Uso Eficiente de las Energías en el Departamento de Arauca.
 - Carhuancho León, F. M. (2012). Aprovechamiento del estiércol de gallina para la elaboración de biol en biodigestores tipo batch como propuesta al manejo de residuo avícola.
 - Castro, R., Solís, M., Chicatto, V., & Solís, A. (2019). PRODUCCIÓN DE BIOGÁS MEDIANTE CODIGESTIÓN DE ESTIÉRCOL BOVINO Y RESIDUOS DE COSECHA DE TOMATE (*Solanum lycopersicum* L.). *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 36(3), 529–539. <https://doi.org/10.20937/rica.53545>
 - Cedeño, M. (2019). Construcción de biodigestor para estimación de potencial energético a partir de la bovinaza. Finca “Las Delicias”, vereda Santa Bárbara, Iquira-Huila. https://repositorio.unbosque.edu.co/bitstream/handle/20.500.12495/2607/Cedeño_Peña_María_Manuela_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y
 - Center for Science Education. (2012). Methane. UCAR. <https://scied.ucar.edu/learningzone/how-climate-works/methane>
 - Código Postal Vereda El Santuario, Puerto Lleras. (s. f.). Recuperado 10 de octubre de 2022, de <https://codigo-postal.co/colombia/meta/puerto-lleras/vereda-el-santuario/>
 - Conil, P. (2018). Gas Natural Renovable para el desarrollo rural. Biotec. <https://www.ccc.org.co/bion/wp-content/uploads/pdf/26-abril2018/PhilippConilBiotec.p>
 - DANE. (2012). Municipios del Departamento del Meta.
 - Decreto 2981. (2013). Por el cual se reglamenta la prestación del servicio público de aseo. http://wsp.presidencia.gov.co/Normativa/Decretos/2013/Documents/DICIEMBRE/20/DECRETO_2981_DEL_20_DE_DICIEMBRE_DE_2013.pdf
 - Díaz, D., & Salazar, L. (2019). Estudio de factibilidad para el diseño de un biodigestor de aprovechamiento sostenible de excretas de bovino en la hacienda Los Naranjos, Tambo Cauca. https://repositorio.unbosque.edu.co/bitstream/handle/20.500.12495/2143/Díaz_Guio_David_Santiago_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y
 - Durazno Coronel, A. D. (2018). Valoración de estiércol bovino y porcino en la producción de biogás en un biodigestor de producción por etapas (Bachelor's thesis).

- Eaton, A. B. (2009). The role of small-scale biodigesters in the energy, health, and climate change baseline in Mexico.
- Ecopetrol. (2014). Metodología para la identificación y cuantificación de emisiones fugitivas de metano en campos de producción. Ministerio de Medio Ambiente. https://www.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/Geses_efecto_invernadero/Guía_Metano_con_ISBN__pdf.pdf
- Editorial La República S.A.S. (2021). Aumento de 92% en precios del GLP impactará a cerca de 12 millones de usuarios. Diario La República. <https://www.larepublica.co/economia/el-aumento-de-92-en-los-precios-del-glp-estaria-impactando-a-12-millones-de-usuarios-3220367>
- Escobedo, J. (2011). Biogás como combustible alternativo para una estufa y un motor de un cilindro Ciclo Otto. http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0667_M.pdf
- Esposito, G., Frunzo, L., Giordano, A., Liotta, F., Panico, A., & Pirozzi, F. (2012). Anaerobic co-digestion of organic wastes. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 11, 325-341.
- FAO. (2011). Manual de biogás. <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>
- Font-Palma, C. (2019). Methods for the treatment of cattle manure—a review. *C*, 5(2), 27.
- García Rodríguez, A. M., & Gómez Franco, J. D. (2016). Evaluación de la producción de biogás a partir de residuos vegetales obtenidos en la central de abastos de Bogotá mediante digestión anaerobia (Bachelor's thesis, Fundación Universidad de América).
- Godar, P. B., Hoch, J., Johnson, L., de Koning, J., Medina, J., Steinbrenner, G., ... & Weigelt, V. (2010). La producción familiar como alternativa de un desarrollo sostenible para la Amazonía: Lecciones aprendidas de iniciativas de uso forestal por productores familiares en la Amazonía boliviana, brasilera, ecuatoriana y peruana. cifor.
- Gonzales Guerra, E. F., Castillo Chanava, F. M., Correa Correa, S. D. S., & Retto Saavedra, C. R. (2018). Sistema de aprovechamiento de residuos orgánicos de ganado vacuno y su aplicación en la Agropecuaria Campos del Chira EIRL.
- Grupo Energía Bogotá. (2014). Caracterización del área de influencia del proyecto-Suelos.
- Hernández Ramírez, E. J. (2018). Evaluación de herramientas para el análisis experimental de biocombustibles en laboratorios de la Universidad Cooperativa de Colombia.
- IDEAM. (2010). Atlas Climatológico de Colombia. <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasClimatologico.html>
- IGAC. (2000). Mapa Digital de Suelos del Departamento de Meta, República de Colombia. Escala 1:100.000.
- Kazimierski, M. (2020). La transición energética como oportunidad de descentralización y desconcentración. Un acercamiento al potencial de la generación distribuida de energía renovable en Argentina y su aplicación en San Juan.
- Kythreotou, N., Tassou, S. A., & Florides, G. (2012). An assessment of the biomass potential of Cyprus for energy production. *Energy*, 47(1), 253-261.
- López, A., & Ruiz, C. (2014). Evaluación de la producción de biogás a partir del buchón de agua mediante codigestión anaerobia con estiércol bovino. https://repository.eafit.edu.co/xmlui/bitstream/handle/10784/8225/AnaMaria_LopezAguirre_Cristina_RuizRestrepo_2014.pdf;jsessionid=E0F9E4F6EBBF8195AEE3CA4790DDEDB2?sequence=2
- López Landaeta, C. Z., y Romero Umaña, R. (2013). Análisis del Proceso Constructivo del Malecón Turístico en el Municipio de Puerto Lleras Departamento del Meta. 14–27.
- López, A., & Ruiz, C. (2014). Evaluación de la producción de biogás a partir del buchón de agua mediante codigestión anaerobia con estiércol bovino.

https://repository.eafit.edu.co/xmlui/bitstream/handle/10784/8225/AnaMaria_LopezAguirre_Cristina_RuizRestrepo_2014.pdf;jsessionid=E0F9E4F6EBBF8195AEE3CA4790DDEDB2?sequence=2

- Marcet, X., Marcet, M., & Vergés, F. (2018). Qué es la economía circular y por qué es importante para el territorio. Asociación Pacto Industrial de La Región Metropolitana de Barcelona. www.pacteindustrial.org
- Mazareli, R., Duda, R., Leite, V., & Oliveira, R. (2016). Anaerobic co-digestion of vegetable waste and swine wastewater in high-rate horizontal reactors with fixed bed. *Waste Management*, 52, 112–121. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.021>
- MINHACIENDA, MINAMBIENTE, CVC, Consorcio Pomca Quindio. (2017). Caracterización de la Cuenca del Río La Vieja. Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Río La Vieja.
- Mejías-Brizuela, N., Orozco-Guillén, E., & Galáan-Hernández, N. (2016). Aprovechamiento de los residuos agroindustriales y su contribución al desarrollo sostenible de México. *Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales*, 2(6), 27-41.
- Merlin, P., Gopinath, L., & Divya, D. (2014). A review on anaerobic decomposition and enhancement of biogas production through enzymes and microorganisms. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 34, pp. 167–173). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.010>
- Mora, C., & Berbeo, M. (2010). Manual de Gestión Integral de Residuos. <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/IA/INS/manual-gestion-integral-residuos.pdf>
- Naciones Unidas. (2018). La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe. www.cepal.org/es/suscripciones
- Navarro, N. (2017). Potencial técnico para la producción de biogás, generado a partir de residuos orgánicos producidos en la comuna de Independencia. [http://mgpa.forestaluchile.cl/Tesis/Navarro Natalia.pdf](http://mgpa.forestaluchile.cl/Tesis/Navarro%20Natalia.pdf)
- Lozano Cervera, J. L. (2015). Aplicación del control difuso de la temperatura en un biodigestor anaeróbico para la generación de biogás en condiciones de invernadero en Tacna.
- Pabuenta, M. A., & Pasqualino, J. (2014). Potencial de uso de biogás en Colombia. *Teknos revista científica*, 27-33.
- Pacheco González, S. I. (2016). Construcción y evaluación de un digestor anaerobio para la producción de biogás a partir de residuos de alimentos y poda a escala banco (Doctoral dissertation).
- Pérez, P., & Viniegra, G. (1983). Potencial del uso del estiércol en la alimentación de los bovinos. <https://www.fmvz.unam.mx/fmvz/cienciavet/revistas/CVvol11/CVv1c10.pdf>
- Pérez, S., Bautista, M., Hernández, A., & Enriquez, J. (2017). Evaluación del potencial de generación de estiércol como materia prima para la producción de biogás en la Zona Altamira, Tamaulipas. In *Artículo Revista de Sistemas Experimentales Marzo* (Vol. 4, Issue 10). www.ecorfan.org/bolivia
- Quillos Ruiz, S. A., Escalante Espinoza, N. J., Sánchez Vaca, D. A., Quevedo Novoa, L. G., & De La Cruz Araujo, R. A. (2018). Residuos sólidos domiciliarios: caracterización y estimación energética para la ciudad de Chimbote. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 84(3), 322-335.
- Racines Cuesta, A. V. D. R. (2018). Análisis de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero mediante descomposición aeróbica de residuos industriales en mezcla con residuos pecuarios (Master's thesis, Universidad Andina Simón Bolívar, Sede Ecuador)

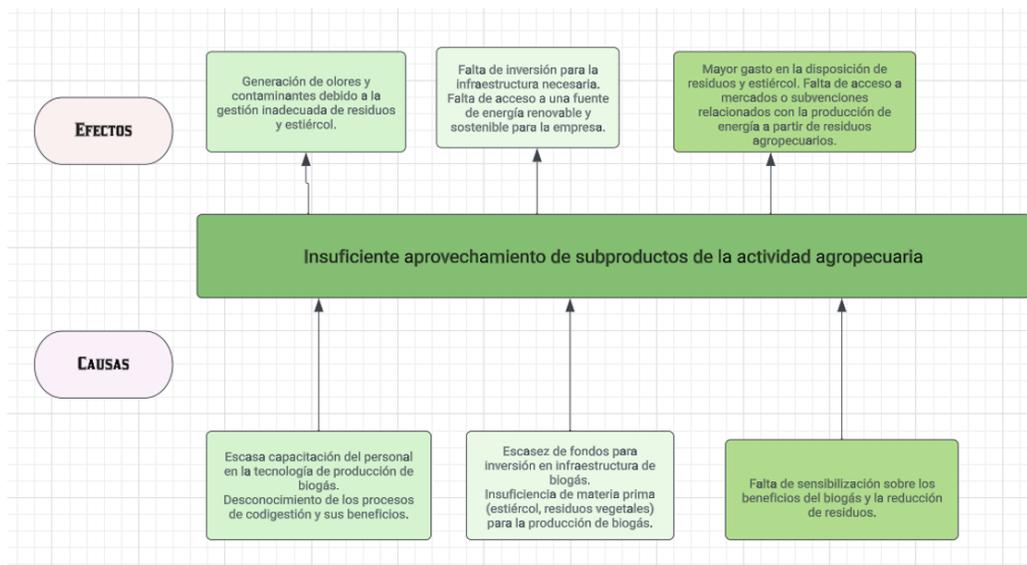
- Ramos Velarde, R. (2014). Diseño de catalizadores heterogéneos para la obtención de hidrocarburos mediante el craqueo de aceites vegetales.
- Romero, H., Vega, C., Zuma, J., Pesantez, F., Camacho, A., & Redrovan, F. (2020). Comparison of the methane potential obtained by anaerobic codigestion of urban solid waste and lignocellulosic biomass. *Energy Reports*, 6, 776–780. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.10.013>
- Sampieri, R. H. (2018). Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. McGraw Hill México.
- Sarabia, M., Laines, J., Sosa, J., Escalante, E. (2017). Producción de biogás mediante codigestión anaerobia de excretas de borrego y rumen adicionadas con lodos procedentes de una planta de aguas residuales. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33(1), 109–116. <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.01.10>
- Simbaqueva Aguilera, A. M., & Urrego León, M. A. (2019). Evaluación de la producción de metano en la digestión anaerobia de la especie invasora Retamo espinoso y el residuo agrícola rastrojo de maíz mediante el uso de un biorreactor Batch (Bachelor's thesis, Universidad El Bosque).
- Sompong, O., Boe, K., & Angelidaki, I. (2012). Thermophilic anaerobic co-digestion of oil palm empty fruit bunches with palm oil mill effluent for efficient biogas production. *Applied Energy*, 93, 648-654.
- Soria, M., Ferrera, R., Etchevers, J., Alcántar, G., Trinidad, J., Borges, L., & Pereyda, G. (2001). Producción de biofertilizantes mediante biodigestión de excreta líquida de cerdo. *Biodigestion of Hog Slurry to Produce Biomanure. Terra Latinoamericana*, 19, 353–362. <https://www.redalyc.org/pdf/573/57319408.pdf>
- S, K., Ibrahim, M., Quaik, S., & Ismail, S. (2016). An Introduction to Anaerobic Digestion of Organic Wastes. In *Prospects of Organic Waste Management and the Significance of Earthworms* (pp. 23–44). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24708-3_2
- Smith, K.R., Mehta, S. y Maeusezahl-Feuz, M. 2004. Indoor smoke from household solid fuels. En M. Ezzati, A. Lopez, A. Rodgers, S. Vander Hoorn y C. Murray, eds. *Comparative quantification of health risks: global and regional burden of disease due to selected major risk factors*, pp. 1435-1493. Ginebra, Suiza, OMS
- Titusunta López, D. A. (2016). Determinación de Impactos Ambientales y Propuesta de Plan de Manejo Ambiental en el Centro de Comercialización de Ganado Vacuno de la Ciudad de Machachi en el periodo 2016 (Bachelor's thesis, Ecuador, Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC)).
- u, J., Watson, J., Zeng, J., Li, H., Zhu, Z., Wang, M., ... & Liu, Z. (2018). Biocrude production and heavy metal migration during hydrothermal liquefaction of swine manure. *Process Safety and Environmental Protection*, 115, 108-115.
- Vadas P.A., Aarons S.R., Butler D.M., Dougherty W.J. A New Model for Dung Decomposition and Phosphorus Transformations and Loss in Runoff. *Soil Research*, volumen 49, 2011: 367-375.
- Vallejo, W. (2008). Estudio de Viabilidad para el Aprovechamiento del Biogás Producido en el Sitio de Disposición Final de Navarro, Bajo los Mecanismos Establecidos en el Protocolo de Kioto 2008. Universidad Santiago de Cali. Gerencia Ambiental y Desarrollo Sostenible Empresarial
- Velásquez, M., Rincón, J., Guevara, P., Vargas, J., Castellanos, D., Duarte, C., Quintero, O; Durán, D., Morales, Y., Zarama, L., & Quintero, J. (2018). Estimación del potencial de

conversión a biogás de la biomasa en Colombia y su aprovechamiento.

[https://bdigital.upme.gov.co/jspui/bitstream/001/1317/1/Informe final.pdf](https://bdigital.upme.gov.co/jspui/bitstream/001/1317/1/Informe%20final.pdf)

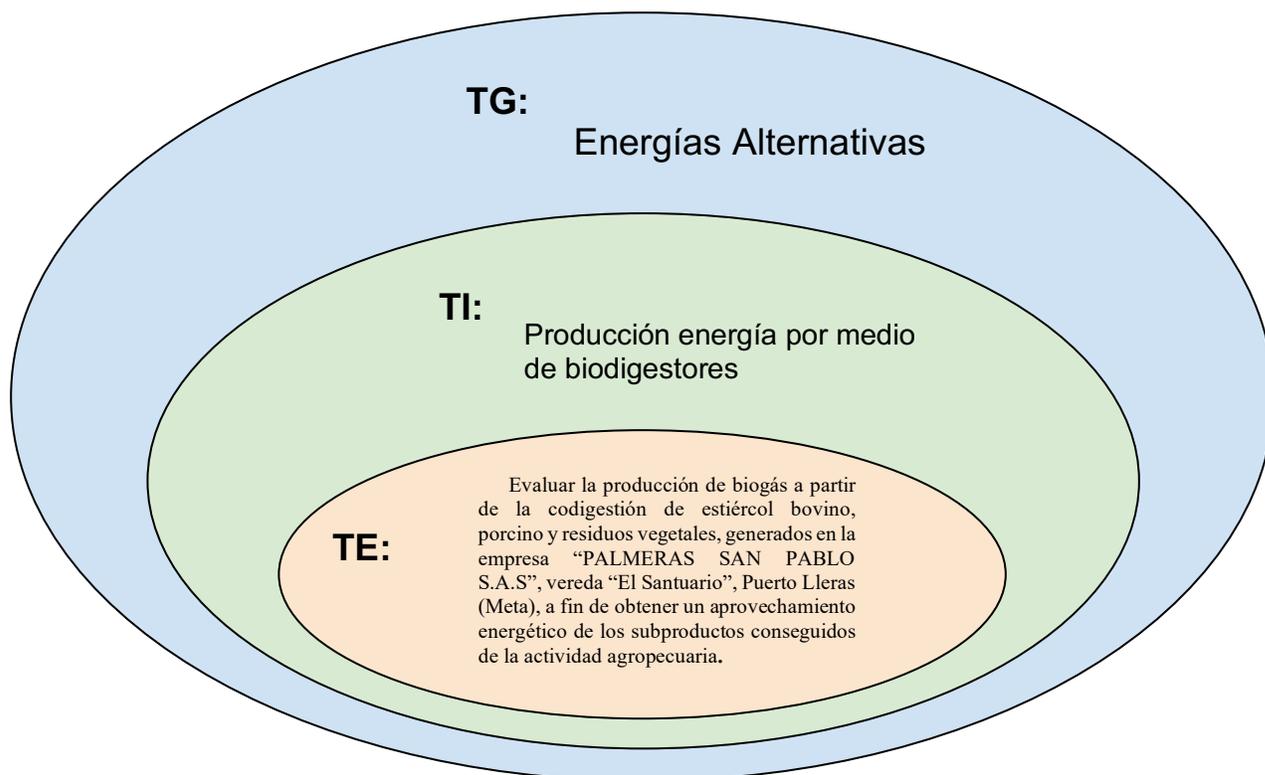
- Vera, I., Martínez, J., Estrada, M., & Ortiz, A. (2014). Potencial de generación de biogás y energía eléctrica Parte I: excretas de ganado bovino y porcino. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 15(3), 429–436. [https://doi.org/10.1016/s1405-7743\(14\)70352-x](https://doi.org/10.1016/s1405-7743(14)70352-x)
- Vergara Angel, E. (2013). Análisis técnico y económico de un digestor para tratar los residuos de bovinos y aprovechar el biogás.
- Woittiez, L. S., van Wijk, M. T., Slingerland, M., van Noordwijk, M., & Giller, K. E. (2018). Brechas de rendimiento en el cultivo de palma de aceite: una revisión cuantitativa de factores determinantes. *Palmas*, 39(1), 16-68.
- Zhang, C., Xiao, G., Peng, L., Su, H., & Tan, T. (2013). The anaerobic co-digestion of food waste and cattle manure. *Bioresource technology*, 129, 170-176.
- Ziemiński, K., & Frąc, M. (2012). Methane fermentation process as anaerobic digestion of biomass: Transformations, stages and microorganisms. *AFRICAN JOURNAL OF BIOTECHNOLOGY*, 11(18). <https://doi.org/10.5897/ajbx11.054>

10. Anexos



Anexo 1. Árbol de problemas

Fuente: (Autores, 2023).



Anexo 2. Contextualización de las teorías. TG (Teoría general), TI (Teoría intermedia), TE (Teoría específica).

Fuente: (Autores, 2023).



Anexo 3. Proliferación de plagas por manejo indistinto de heces porcinas. Fuente: (Autores, 2023).



Anexo 4. Proliferación de plagas por actual manejo de heces bovinas y residuos vegetales. Fuente: (Autores, 2023).



Anexo 5. Lugar alternativo de pastoreo. Fuente: (Autores, 2023).



Anexo 6. Heces porcinas sin regulación. Fuente: (Autores, 2023).



Anexo 7. Acumulación de heces porcinas en lugar de alimentación. Fuente: (Autores, 2023).



UNIVERSIDAD
EL BOSQUE

Universidad El Bosque- 2023

Encuesta para la identificación de las actividades que realizan y el conocimiento que tienen los trabajadores de la empresa PALMERAS SAN PABLO, sobre los residuos agropecuarios generados por esta misma.

Esta encuesta tiene como finalidad, conocer el manejo y disposición final de los residuos agropecuarios generados por la empresa PALMERAS SAN PABLO.

NOMBRE: _____ EDAD: _____

¿Cuánto tiempo lleva trabajando en la empresa? _____

¿Cuál es su labor en la empresa? _____

Marque con una X la respuesta correcta según corresponda

1. ¿Cuáles de los siguientes residuos se generan en mayor cantidad en la empresa?

Estiércol bovino () Estiércol porcino () Mesocarpio ()

2. ¿Conoce usted que es la gestión de residuos sólidos orgánicos?

Si () No ()

3. ¿Cree usted que estos residuos se puedan aprovechar?

Si () No () ¿Por qué?

4. ¿Conoce usted practicas en donde se pueda generar energía a partir de los residuos sólidos orgánicos?

Si () No () ¿Cuáles?

5. ¿Usted estaría dispuesto a contribuir con el aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos agropecuarios generados en la empresa?

Si () No () ¿Por qué?

6. ¿Cree usted que una adecuada disposición de los residuos agropecuarios contribuiría a la empresa?

Si () No () ¿Por qué?

Anexo 8. Formato de encuesta. Fuente: (Autores, 2023).



Anexo 9. Forma de empaque de muestras iniciales. Fuente: (Autores, 2023).



Anexo 10. Pesaje inicial residuo vegetal. Fuente: (Autores, 2023).

Anexo 11. Pesaje inicial estiércol bovino. Fuente: (Autores, 2023).

Anexo 12. Pesaje inicial de estiércol porcino. Fuente: (Autores, 2023).



Anexo 13. Caracterización residuos muffla. Fuente: (Autores, 2023).



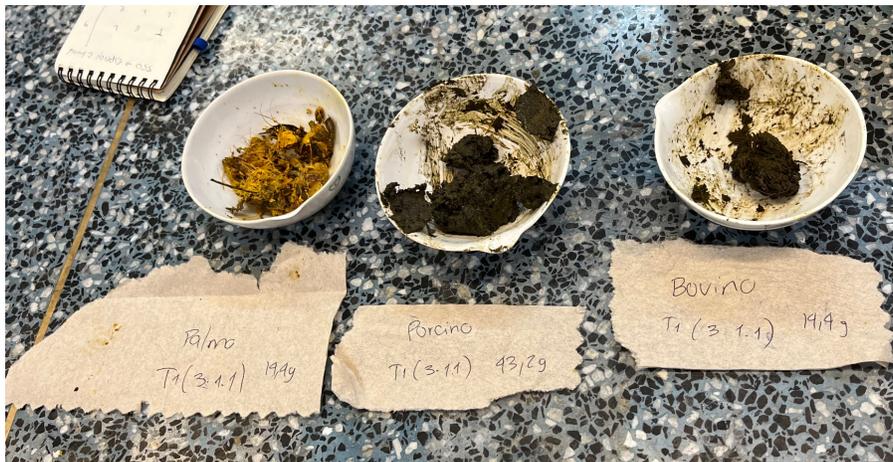
Anexo 14. Pesaje final residuo vegetal. Fuente: (Autores, 2023).

Anexo 15. Pesaje final estiércol bovino. Fuente: (Autores, 2023).

Anexo 16. Pesaje final de estiércol porcino. Fuente: (Autores, 2023).



Anexo 17. Sustrato pesado del primer tratamiento - Proporción 1/1/1. Fuente: (Autores, 2023).



Anexo 18. Sustrato pesado del segundo tratamiento - Proporción 3/1/1. Fuente: (Autores, 2023).



Anexo 19. Sustrato pesado del tercer tratamiento - Proporción 1/3/1. Fuente: (Autores, 2023).



Anexo 20. Desmontaje del primer intento de producción de biogás. Fuente: (Autores, 2023).



Anexo 21. Medición de pH de lodos de reactores fallidos. Fuente: (Autores, 2023).



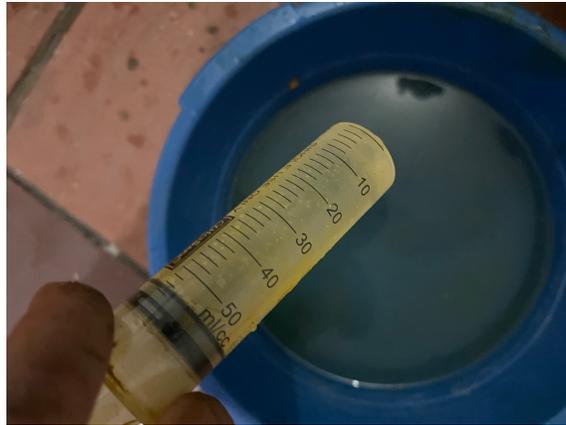
<p>Anexo 22. Residuo vegetal para segundo montaje. Fuente: (Autores, 2023).</p>	<p>Anexo 23. Estiércol porcino para segundo montaje. Fuente: (Autores, 2023).</p>	<p>Anexo 24. Estiércol bovino para segundo montaje. Fuente: (Autores, 2023).</p>
--	--	---

		
<p>Anexo 25. Pesaje de sustrato de residuo vegetal para el tratamiento de proporción 1/1/1 del segundo montaje. Fuente: (Autores, 2023).</p>	<p>Anexo 26. Pesaje de sustrato de estiércol bovino para el tratamiento de proporción 1/1/1 del segundo montaje. Fuente: (Autores, 2023).</p>	<p>Anexo 27. Pesaje de sustrato de estiércol porcino para el tratamiento de proporción 1/1/1 del segundo montaje. Fuente: (Autores, 2023).</p>

		
---	---	---

<p>Anexo 28. Pesaje de sustrato de residuo vegetal para el tratamiento de proporción 3/1/1 del segundo montaje. Fuente: (Autores, 2023).</p>	<p>Anexo 29. Pesaje de sustrato de estiércol porcino para el tratamiento de proporción 3/1/1 del segundo montaje. Fuente: (Autores, 2023).</p>	<p>Anexo 30. Pesaje de sustrato de estiércol bovino para el tratamiento de proporción 3/1/1 del segundo montaje. Fuente: (Autores, 2023).</p>
---	---	--

		
<p>Anexo 31. Pesaje de sustrato de residuo vegetal para el tratamiento de proporción 1/3/1 del segundo montaje. Fuente: (Autores, 2023).</p>	<p>Anexo 32. Pesaje de sustrato de estiércol porcino para el tratamiento de proporción 1/3/1 del segundo montaje. Fuente: (Autores, 2023).</p>	<p>Anexo 33. Pesaje de sustrato de estiércol bovino para el tratamiento de proporción 1/3/1 del segundo montaje. Fuente: (Autores, 2023).</p>



Anexo 34. Cantidad de agua agregada a los reactores en el segundo montaje. Fuente: (Autores, 2023).

<p>Anexo 35. Cantidad de agua desplazada de T3 y T2, respectivamente. Fuente: (Autores, 2023).</p>	<p>Anexo 36. Cantidad de biogás acumulado (mL) T2. Fuente: (Autores, 2023).</p>	<p>Anexo 37. Cantidad de biogás acumulado (mL) T3. Fuente: (Autores, 2023).</p>



Anexo 38. Temperatura manipulada para ciertos reactores. Fuente: (Autores, 2023).

Objetivos		Actividades 	CRONOGRAMA																																			
			Meses																																			
			Marzo			Abril					Mayo					Junio					Julio					Agosto					Septiembre					Octubre		
Objetivo general	Objetivos Específicos		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33			
Evaluar la producción de biogás a partir de la codigestión de estiércol bovino, porcino y residuos vegetales, generados en la empresa PALMERAS SAN PABLO S.A.S a fin de obtener un aprovechamiento energético de los subproductos conseguidos de la actividad agropecuana.	Determinar el potencial energético teórico que se puede alcanzar, a partir de la cuantificación de la cantidad de biogás producido en las condiciones del lugar de ensayo.	Revisión bibliográfica																																				
		Determinación de tipos de biodigestores																																				
		Variables del biodigestor																																				
		Visita de campo																																				
		Entrevista dirigida a administradores y unidades productivas																																				
	Valorar la producción de biogás y la generación de lodos potencialmente aplicables como compostaje, a partir de distintas proporciones de los residuos orgánicos establecidos, mediante el uso de reactores anaerobios.	Biomasa producida por animal																																				
		Promedio consumos de la Empresa PALMERAS SAN PABLO S.A.S																																				
		Evaluación de los resultados del diagnóstico																																				
		Plantamiento de la metodología																																				
		Ejecución de búsqueda bibliográfica																																				
		Selección de relaciones partiendo de la evaluación de alternativas																																				
		Elaboración de la tabla del resumen de la metodología																																				
		Busqueda bibliográfica de parámetros de diseño del modelo del biodigestor																																				
		Visita de Campo																																				
		Estandarización de parámetros y variables de diseño, con las condiciones del caso de estudio																																				

Anexo 39. Cronograma acordado para el desarrollo de la investigación. Fuente: (Autores, 2023).

Rubro	Justificación	Efectivo (\$)	Especie (\$)	Total
1. Personal	Mano de obra pesada-Recolector de residuos sólidos	\$ 8.000.000		\$ 8.000.000

2. Equipos especializados	Sensor arduino-Sonda MQ4-Gasometro		\$ 4.000.000 * 20% =800.000 -	\$ 800.000
2.1. Equipos propios	Herramientas-Tuberia-Planta de compostaje-Piscina de secado-Biodigestor		\$ 20.000.000 *20%= 4.000.000	\$ 4.000.000
3. Materiales y reactivos	Materiales de construcción-Adecuación de redes eléctricas	\$ 3.000.00 0		\$ 3.000.000
4. Salidas de campo	Visitas técnicas al lugar, para la caracterización- gasolina y peajes	\$ 1.500.00 0		
5. Refrigerios	Almuerzos,Desayuno,Cena	\$ 4.000.00 0		\$ 4.000.000
6. Capacitaciones	Capacitación de empleados	\$ 1.000.00 0		\$ 1.000.000
7. Adquisición o actualización de software	Word-Excel-Rstudio	\$ 0	\$ 0	-----
Total				\$ 20*800.000

Anexo 40. Presupuesto estipulado para la realización de la investigación. Fuente: (Autores, 2023).

Día operación	Biogas acumulado (mL)	Temperatura corregida (K)	Concentración CH₄(%)	Volumetría de CH₄ (mLCH₄ /gSV)
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0

3	0	0	3	0
4	0	0	2,5	0
5	0	0	5	0
6	0,05	288,3	7	1,25
7	0,15	288,6	5	1,79
8	0,2	289,9	8	1,43
9	0,3	291	10	3,57
10	0,4	288,6	15	5,36
11	0,5	289,2	12	4,29
12	0,65	287,7	25	13,39
13	0,8	285,5	39	20,89
14	0,9	283,9	41	14,64
15	1,05	284,6	55	29,46
16	1,15	283,8	60	21,43
17	1,3	287,4	67	35,89
18	1,45	285,5	70	37,50
19	1,6	284,2	71	38,04
20	1,74	285,5	81	40,50
21	1,88	284,4	70	35,00
22	2,03	281,6	65	34,82
23	2,18	283,4	63	33,75
24	2,28	281,8	55	19,64
25	2,43	285,8	60	32,14
26	2,58	284,5	62	33,21
27	2,68	283,5	65	23,21
28	2,83	283,6	65	34,82
29	2,98	283,6	65	34,82
30	3,08	286,1	71	25,36
31	3,28	286,5	65	46,43
32	3,38	285,5	70	25,00
33	3,7	284,7	65	74,29
34	4,1	284,4	71	101,43
35	4,2	285,2	73	26,07
36	4,6	283,9	72	102,86
37	5	287,1	74	105,71
38	5,3	285,5	78	83,57
39	5,7	285,8	74	105,71
40	5,8	287,5	71	25,36
41	6,3	284,7	71	126,79
42	6,7	286,6	65	92,86
43	7,15	286,1	65	104,46

44	7,45	285	71	76,07
45	7,88	286,5	65	99,82
46	8,28	286,1	65	92,86
47	8,83	287,9	65	127,68
48	9,33	287,1	75	133,93
49	9,83	285,9	70	125,00
50	10,33	288,4	65	116,07

Anexo 41. Datos obtenidos del reactor 1 (T1). Fuente: (Autores, 2023).

Día operación	Biogas acumulado (mL)	Temperatura corregida (K)	Concentración CH₄(%)	Volumetría de CH₄ (mLCH₄ /gSV)
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	1	0
4	0	0	1	0
5	0	0	3	0
6	2	288,3	2	0,13
7	7	288,6	1	0,16
8	12	289,9	5	0,78
9	19	291	12	2,63
10	29	288,6	18	5,63
11	39	289,2	15	4,69
12	49	287,7	22	6,88
13	59	285,5	30	9,38
14	69	283,9	33	10,31
15	84	284,6	40	18,75
16	99	283,8	65	30,47
17	119	287,4	66	41,25
18	129	285,5	61	19,06
19	144	284,2	40	18,75
20	158	285,5	40	17,50
21	171	284,4	65	26,41
22	181	281,6	69	21,56
23	196	283,4	68	31,88
24	211	281,8	62	29,06
25	226	285,8	60	28,13
26	236	284,5	68	21,25

27	251	283,5	60	28,13
28	266	283,6	60	28,13
29	281	283,6	65	30,47
30	291	286,1	65	20,31
31	311	286,5	75	46,88
32	341	285,5	78	73,13
33	361	284,7	60	37,50
34	381	284,4	71	44,38
35	411	285,2	71	66,56
36	446	283,9	60	65,63
37	481	287,1	69	75,47
38	511	285,5	68	63,75
39	551	285,8	60	75,00
40	596	287,5	74	104,06
41	636	284,7	74	92,50
42	676	286,6	60	75,00
43	721	286,1	69	97,03
44	771	285	69	107,81
45	821	286,5	69	107,81
46	871	286,1	60	93,75
47	921	287,9	60	93,75
48	971	287,1	60	93,75
49	1021	285,9	60	93,75
50	1071	288,4	60	93,75

Anexo 42. Datos obtenidos del reactor 2 (T2). Fuente: (Autores, 2023).

Día operación	Biogas acumulado (mL)	Temperatura corregida (K)	Concentración CH₄(%)	Volumetría de CH₄ (mLCH₄ /gSV)
1		0	0	0
2		0	0	0
3		0	1	0
4		0	0,5	0
5		0	1	0
6		288,3	1,2	0
7		288,6	5	0
8	2	289,9	7	0,44
9	5	291	15	2,34

10	5	288,6	11	1,72
11	10	289,2	17	5,31
12	10	287,7	15	4,69
13	10	285,5	18	5,63
14	10	283,9	27	8,44
15	10	284,6	38	11,88
16	20	283,8	45	28,13
17	20	287,4	44	27,50
18	20	285,5	69	43,13
19	30	284,2	50	46,88
20	30	285,5	60	56,25
21	30	284,4	55	51,56
22	30	281,6	50	46,88
23	30	283,4	55	51,56
24	30	281,8	55	51,56
25	30	285,8	60	56,25
26	30	284,5	55	51,56
27	30	283,5	60	56,25
28	30	283,6	67	62,81
29	30	283,6	62	58,13
30	45	286,1	65	91,41
31	45	286,5	63	88,59
32	45	285,5	65	91,41
33	45	284,7	64	90,00
34	45	284,4	66	92,81
35	45	285,2	66	92,81
36	50	283,9	66	103,13
37	50	287,1	64	100,00
38	50	285,5	64	100,00
39	50	285,8	70	109,38
40	50	287,5	64	100,00
41	62	284,7	62	120,13
42	62	286,6	62	120,13
43	62	286,1	65	125,94
44	70	285	69	150,94
45	62	286,5	62	120,13
46	62	286,1	62	120,13
47	55	287,9	68	116,88
48	62	287,1	68	131,75
49	62	285,9	70	135,63
50	65	288,4	70	142,19

Anexo 43. *Datos obtenidos del reactor 3 (T3).* Fuente: (Autores, 2023).



Anexo 44. Recolección de muestras para hacer los aforos.



Anexo 45. Evidencia de fruto no recolectado en el suelo.

Fuente	DF	Sumas de cuadrados	Valor cuadrático medio	F estadístico	Valor P
Tratamientos	2	0.6881	0.344	6.5146	0.00295
Error (<i>Entre los grupos</i>)	53	2.799	0.05281		
Total	53	3.4871	0.0635		

Anexo 46. Prueba de varianza unidireccional (ANOVA).



Anexo 47. Montaje con resistencia (30°C).



-231102-08.29

Calle 37A 45-53 Barzal Alto
Via La Azotea Villavicencio
PBA: (08) 6614000
Para reporte de fallas o
emergencias llamar: 115
(2000 desde móvil / celular)
Línea gratuita Nacional: 01800091615
Línea emergencia
24 Horas 316 027 8035

CÓDIGO DEL CLIENTE
CITE ESTE NÚMERO PARA CONSULTA O PAGO

www.electrificadorademetra.com

104613567

Espacio para sello

Subscriptor: **SAMUEL QUIROZ SALDARRIAGA**
Dirección: **FCA SAN PABLO VDA EL SANTUARIO**
Ciudad: **Puerto Lleras**

DETALLE DE CONSUMO



(3) A-S Lectura Anterior 25751 Lectura Actual 26022
Tipo de Lectura Con Lectura Anomalia 0

Consumo Promedio Utl. 6 Meses: 381 Último Pago: \$882710 28-08-23
Factura No.: 202310104613567 Periodo: 15-09-2023/15-10-2023
Facturas Atrasadas: 1 Rutas: 69-6957790140

INFORMACIÓN TÉCNICA

MARCA CONTADOR (ES)	NÚMERO (S)	FACTOR
HOL	170513578	1

FACTURACIÓN DE 19-OCT-2023

ESTRATO	CLASE	Rural	CICLO
4			69

SERVICIO	CÓDIGO CIUJ	ESTADO DEL PREDIO	PARA SUSPENSIÓN
Residencial	Rural		

INDICADORES DE CALIDAD

Cód. Circuito	AR1103	(H)C Horas Compensadas	0
COO. Transformador	PET12317	(V) Veces a compensar	0
Grupo de calidad	32	(CE) Consumo estimado a compensar	400
(DU) Duración en horas de interrupciones	134.456	(P) Porcentaje de descuento del cargo	16
(FR) Número total de interrupciones	63	(D) Cargo de Distribución	142.22
(DR) Meta por duración	75.97	(FR) Meta por Frecuencia	69

V/a Compensar \$ 0

Costo unitario de la prestación del servicio de EMSA (\$ / kWh)

CONCEPTO	CONCEPTO	CONCEPTO	CONCEPTO
Compra energía al generador	G \$ 378.33	Pérdidas reconocidas	PR \$ 68.22
Transporte en el sistema de transmisión nacional	T \$ 47.02	Otros costos asociados al mercado de energía	O \$ 19.5
Transporte en el sistema de distribución local	D \$ 209.7	Costo de comercialización	C \$ 93.43
Total costo unitario de prestación del servicio (monomio) Nivel (1) CU=G+T+D+C+PR+R			816.2

Subsidio	Consumo kWh	Vr. Unitario kW	Factura	Interés Moratorio Residencial	0,49%
FOES				Interés Moratorio No Residencial	2,35%

DATOS DE FINANCIACIÓN	
VALOR FINANCIACIÓN	CUOTA ACTUAL
SALDO FINANCIACIÓN	CUOTAS PENDIENTES
INTERESES %	No. DE CUOTAS

VALOR FINANCIACIÓN	
SALDO A FAVOR	\$0
SALDO EN RECLAMACIÓN	\$0

DETALLE DE LA FACTURA

Liquidación del consumo de energía:
737.37 (Valor kWh) x 271 (Consumo en kWh) \$199.827

VALOR NETO: \$199.827

SUBTOTAL VALOR CONSUMO OTROS CONCEPTOS: \$199.827
Saldo Anterior \$244.110
Interés Mora \$1.191
Ajuste a la Decena \$2

SUBTOTAL VALOR OTROS DESCUENTOS: \$245.303

SUBTOTAL POR CONCEPTOS DE ENERGIA \$445.130

DETALLE PORTAFOLIO

Convenio	Capital	Intereses	Valor a pagar	No. Cuota

SUBTOTAL POR CONCEPTOS DE PORTAFOLIO \$ \$0

Pague antes de	Suspensión desde	TOTAL A PAGAR
INMEDIATO	INMEDIATO	\$445.130

Se informa a todos nuestros clientes que a partir de la fecha podrán cancelar sus facturas VENCIDAS en cualquier punto de CONSUERTE

Edwin David Guzman Bohorquez
EDWIN DAVID GUZMAN BOHORQUEZ
FIRMA GERENTE (E)

PERIODO FACTURADO
15-09-2023/15-10-2023

Código del cliente
104613567

Fecha de vencimiento
INMEDIATO

Valor a pagar
\$445,130



41577099880024498020010461356739000000445130



VIGILADO SUPERSERVICIOS

Anexo 48. Recibo de la luz de la empresa de mayo a junio 2023.

Pares de tratamientos	Q estadística	Valor-p
T1 vs T2	1,94	0,363
T1 vs T3	3.07	0,086
T2 vs T3	5.03	0,0023

Anexo 49. Resultados de la prueba de Tukey HSD.