

Co-digestión anaeróbica de residuos de la cadena agroindustrial del café en operación
semicontinua a escala laboratorio

Jesús David Matiz Ángel y Sebastián David Armenta Romero

Trabajo de Grado para optar al Título de Ingeniero Químico
Modalidad trabajo de investigación

Directora

Liliana del Pilar Castro Molano
Ingeniera Química, Ph.D.

Codirector

Humberto Escalante Hernández
Ingeniero Químico, Ph.D.

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

2024

Dedicatoria

A Dios, porque todo lo que he conseguido es gracias a él, cuando no me creía capaz de seguir y me encontraba cansado, me dio las fuerzas necesarias. A mi mamá Ana, que desde pequeño siempre me apoyo e hizo hasta lo imposible por velar por mi bienestar, este logro es mas de ella que mío, ella siempre ha visto cosas en mí que ni yo mismo lograba percibir, la persona que soy y que seré es gracias a ella. A mi papá Rafael, que me lleno de consejos y me apoyo a pesar de que nos encontramos lejos, su apoyo y su voz de aliento siempre estuvieron presentes. A la Sr Nancy y al Sr Alfonso Elías que me cuidaron de pequeño y me enseñaron que con trabajo duro y perseverancia las cosas se consiguen. A mis tíos, Jesús, Gustavo y Roney que me brindaron su apoyo durante este proceso. A mi prima Paola que la llevo en mi corazón, que en los momentos difíciles siempre estuvo presente. A Ninfa que ha estado conmigo desde el colegio y me ha enseñado a ser mejor persona, su apoyo incondicional y su gran amor han sido un motor en mi vida. Al Sr Luis que me ha tratado como un hijo, se preocupó por mí y por mis cosas, me apoyo en los momentos duros y siempre fue un hombro en el cual recostarse. A mis amigos los de los partidos en los sábados porque esas reuniones lograban despejar mi mente y sacarme de la monotonía, a los de la pensión porque esas noches de risas y juegos, las tendré siempre presentes.

Por último, a mi yo de 17 años que cuando entro a la universidad tenía más dudas que certezas, lleno de temor, quiero decirte que tu esfuerzo no ha sido en vano, los has conseguido, siéntete orgulloso.

Sebastián David Armenta Romero

A Dios, que en los momentos difíciles siempre estuvo conmigo en espíritu, agradecido por los buenos momentos y por darme la valentía necesaria para llevar a cabo este proceso. A mi mamá Sandra, la mujer más importante en mi vida, que siempre me cuida y vela por mi bienestar a pesar de la distancia. A mi padre Martín, que es mi mejor amigo con el que comparto una gran pasión por el fútbol y sus buenas anécdotas, además de brindarme valiosos consejos. A mi hermano Martín Andrés, que siempre estuvo presente como buen hermano mayor. A mi abuela Marlene, que me quiere como si fuera mi madre. A mi amigo de la vida Luis, por los buenos momentos y las risas desde el colegio hasta el día de hoy. A todos mis amigos y compañeros de carrera, que sin ellos no habría sido lo mismo. A la Sra. Betty y al Sr. Miguel, por ser tan amables y hacerme sentir cómodo desde el primer día que llegué a Bucaramanga. Y a todas las personas que conocí durante la carrera, con las que aprendí muchas cosas y pasé situaciones inolvidables que siempre tendré presente. Por último, a mi yo de hace 5 años, que a pesar de afrontar situaciones difíciles durante este proceso nunca bajo los brazos, se hizo más fuerte y hoy puedo decirle orgulloso que dimos un pasito importante y que seguiremos luchando por alcanzar nuevas metas.

Jesús David Matiz Ángel

Agradecimientos

A Dios, por darnos fortaleza y paciencia durante la ejecución del proyecto

A la Universidad Industrial de Santander por convertirnos en profesionales, por brindar un entorno de aprendizaje constante y crecimiento personal.

A la escuela de Ingeniería Química y a todos los profesores de los que nos llevamos un aprendizaje significativo, además de transmitirnos el sentido de pertenencia con la carrera. Al grupo de investigación de digestión anaerobia y a los laboratorios de biotecnología por proporcionar los recursos y la infraestructura necesarios para llevar a cabo nuestra investigación.

A la profesora Liliana del Pilar Castro, por aceptarnos en la familia de digestión anaerobia, por su orientación, confianza y valiosos conocimientos. Al profesor Humberto Escalante, por su amabilidad y enseñanza brindada. Al ingeniero Juan Guillermo, por darnos la introducción al laboratorio. Al ingeniero Alexander Muñoz, por la ayuda y el acompañamiento incondicional. A todos nuestros compañeros de laboratorio y estudiantes de posgrado, por brindarnos su ayuda cada vez que la necesitamos. A don Guillermo, por la predisposición y guía en los protocolos del laboratorio.

Al señor Juvenal Tarazona y su familia, por abrirnos las puertas a su finca, Villa Tarazona, por su participación y colaboración en la obtención de los sustratos requeridos en la ejecución del trabajo.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	12
1. Objetivos	15
1.1 Objetivo General	15
1.2 Objetivos Específicos.....	15
2. Marco referencial	16
2.1 Beneficio del café	16
2.2 Digestión y co-digestión anaeróbica.....	17
2.3 Digestión anaeróbica con residuos agroindustriales del café	20
3. Metodología	22
3.1 Evaluación de la estabilidad y eficiencia operacional de la co-digestión anaeróbica.....	22
3.1.1 <i>Determinación de las condiciones de operación del proceso</i>	22
3.1.2 <i>Monitoreo del proceso de co-digestión anaerobia</i>	27
3.2 Desarrollo del plan para la aplicación del proceso de co-digestión anaerobia en un biodigestor a escala rural.	28
4. Resultados.....	29
4.1 Estabilidad y eficiencia de la CoDA con residuos agroindustriales del café.....	29
4.1.1 <i>Monitoreo del proceso de co-digestión anaeróbica</i>	29
4.1.2 <i>Rendimiento del proceso de co-digestión anaeróbica</i>	36
4.2 Plan de implementación de la CoDA de residuos agroindustriales del café en un biodigestor a escala rural en una finca cafetera	38
4.2.1 <i>Caso de estudio</i>	38

<i>4.2.2 Estrategia de implementación de la CoDA</i>	39
<i>4.2.3 Viabilidad económica de la implementación de la CoDA</i>	41
<i>4.2.4 Estrategia para el aprovechamiento de los residuos excedentes</i>	44
5. Conclusiones	46
6. Recomendaciones	46
Referencias bibliográficas.....	47

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Caracterización de sustratos</i>	22
Tabla 2 <i>Caracterización fisicoquímica y bioquímica del inóculo</i>	27
Tabla 3 <i>Rendimiento del proceso</i>	37
Tabla 4 <i>Equivalencia energética del biogás producido anualmente</i>	41
Tabla 5 <i>Ingresos y costos (CAPEX-OPEX) para la evaluación económica de la CoDA</i>	42
Tabla 6 <i>Resumen del análisis económico para la CoDA a escala rural</i>	43

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Etapas del proceso de beneficio húmedo del café</i>	16
Figura 2 <i>Dieta de alimentación para la VCO de a) 1 kgSV/m³_{op}*d y b) 0.5 kgSV/m³_{op}*d</i>	26
Figura 3 <i>Concentración de AGV y pH en función del tiempo de monitoreo a velocidades de carga orgánica de a) 1 kgSV/m³_{op}*d y b) 0.5 kgSV/m³_{op}*d</i>	29
Figura 4 <i>Concentración de AGV por cromatografía de gases a diferentes velocidades de carga orgánica a) 1 kgSV/m³_{op}*d y b) 0.5 kgSV/m³_{op}*d</i>	32
Figura 5 <i>Seguimiento a la demanda química de oxígeno soluble en función del tiempo de monitoreo a velocidades de carga orgánica de a) 1 kgSV/m³_{op}*d y b) 0.5 kgSV/m³_{op}*d</i>	33
Figura 6 <i>Producción de metano acumulada durante la CoDA de pulpa y aguas mieles con estiércol bovino a diferentes velocidades de carga orgánica</i>	36
Figura 7 <i>Dieta de alimentación para el biodigestor a escala rural en la finca cafetera</i>	40

Glosario

AGV: Ácidos grasos volátiles

AGVT: Ácidos grasos volátiles totales

AM: Aguas mieles

AME: Actividad metanogénica específica

AH: Actividad hidrolítica

AT: Alcalinidad total

BDG: Biodigestor

CoDA: Co-digestión anaeróbica

DA: Digestión anaeróbica

DQO: Demanda química de oxígeno

DQOs: Demanda química de oxígeno soluble

DQOt: Demanda química de oxígeno total

EB: Estiércol bovino

MonoDA: Monodigestión anaeróbica

P: Pulpa de café

PBM: Potencial de biometanización

PVC: Policloruro de vinilo

SV: Sólidos volátiles

TRH: Tiempo de retención hidráulica

VCO: Velocidad de carga orgánica

Resumen

Título: Co-digestión anaeróbica de residuos de la cadena agroindustrial del café en operación semicontinua a escala laboratorio *

Autor: Jesús David Matiz Ángel, Sebastián David Armenta Romero **

Palabras Clave: co-digestión anaeróbica, residuos del café, pulpa, aguas mieles, cosecha del café, escala laboratorio, biogás

Descripción: En este trabajo de investigación se evaluó la viabilidad de la co-digestión anaeróbica (CoDA) con los residuos agroindustriales del café, aguas mieles (AM) y pulpa de café (P), con estiércol bovino (EB) a escala laboratorio en operación semicontinua, con proyección a su aplicación a escala rural. Inicialmente se pusieron en marcha dos biodigestores tubulares, operados bajo velocidades de carga orgánica (VCO) de 0.5 y 1 kgSV/m³op*d, con una relación de mezcla objetivo en %SV de 66AM:17P:17EB. Debido a la complejidad de los sustratos, se planteó una dieta de alimentación adicionando progresivamente las AM hasta alcanzar la relación de mezcla objetivo. Para evaluar la estabilidad y eficiencia del proceso, se realizó un monitoreo al contenido de AGV, pH, DQO, y producción de biogás. Adicionalmente, se desarrolló un plan para la aplicación de la CoDA a escala rural teniendo como caso de estudio una finca cafetera. El reactor operado a la VCO de 1 kgSV/m³op*d no alcanzó la relación de mezcla objetivo debido a la acumulación de AGV que provocó la inhibición del proceso. Por su parte, el reactor operado con la VCO 0.5 kgSV/m³op*d, completó un TRH con la relación de mezcla objetivo. Se obtuvo un rendimiento de producción de biogás de 0.53 ± 0.04 Nm³biogás/m³op*d ($59.18 \pm 0.85\%$ CH₄) y una remoción de materia orgánica soluble del 95.82%. En condiciones reales, una finca cafetera con una producción de 625 kg/año de grano de café seco, un biodigestor de 6 m³ puede tratar cerca del 57% de los residuos generados. La implementación de la CoDA en una finca cafetera es una inversión rentable, con una tasa interna de retorno (TIR) del 23% y un periodo de recuperación de siete años. En ese sentido, la CoDA es una alternativa técnica y económicamente viable para ser adoptada por las fincas cafeteras del país.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Liliana del Pilar Castro Molano, PhD en Ingeniería Química. Codirector: Humberto Escalante Hernández, PhD en Ingeniería Química

Abstract

Title: Co-digestión anaeróbica de residuos de la cadena agroindustrial del café en operación semicontinua a escala laboratorio *

Author: Jesús David Matiz Ángel, Sebastián David Armenta Romero **

Key Words: anaerobic co-digestion, coffee waste, pulp, honey water, coffee harvest, laboratory scale, biogas

Description: In this research work, the viability of anaerobic co-digestion (ACoD) was evaluated using agro-industrial coffee waste, honey water (HW) and coffee pulp (P), with cow manure (CM) at a laboratory scale in semi-continuous operation, with the prospect of its application in a rural scale. Initially, two tubular biodigesters were set up, operated under organic loading rates (ORL) of 0.5 and 1 kgSV/m³_{op}*d, with a target mixture ratio in %SV of 66HW:17P:17CW. Due to the complexity of the substrates used, a feeding schedule was followed by gradually adding HW until reaching the target mixture ratio. To evaluate the stability and efficiency of the process, monitoring was conducted for the content of VFAs, pH, COD, and biogas production. Additionally, a plan was developed for the application of ACoD on a rural scale, using a coffee farm as a case study. For the reactor operated at an ORL of 1 kgSV/m³_{op}*d, the target mixing ratio was not reached due to the accumulation of VFAs that caused the inhibition of the process. However, with respect to the reactor operated at an ORL of 0.5 kgSV/m³_{op}*d, the target mixing ratio was reached. A biogas production yield of 0.53 ± 0.04 Nm³_{biogas}/m³_{op}*d (59.18 ± 0.85% CH₄) and a soluble organic matter removal of 95.82% were obtained. In real conditions, a coffee farm with a production of 625 kg/year of dry coffee beans, a 6 m³ biodigester can treat approximately 57% of the generated waste. From an economic perspective, the investment for the implementation of ACoD would be recovered in seven years with an IRR of 23%. Therefore, anaerobic co-digestion is a technically and economically viable alternative to be adopted by the coffee farms in the country.

* Degree work.

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: Liliana del Pilar Castro Molano, PhD in Chemical Engineering. Codirector: Humberto Escalante Hernández, PhD in Chemical Engineering.

Introducción

En el proceso tradicional de beneficio del café, llevado a cabo en fincas cafeteras, se genera una gran cantidad de residuos. Por ejemplo, por cada kilogramo de café pergamino seco, se generan 1.08 kg de pulpa y 0.03 m³ de aguas residuales (aguas mieles) (Ponce et al., 2020). El vertimiento inadecuado de estos residuos provoca contaminación en las fuentes hídricas (L. González, 2015), así como impactos negativos en las propiedades y estructura de los suelos. Algunos tratamientos como la sedimentación, el lagunaje y la ozonización son efectivos en la degradación de la materia orgánica. Sin embargo, estos métodos requieren la disponibilidad de grandes áreas, elevados costos y pueden suponer riesgos de eutrofización (Marin-Batista et al., 2016; Suárez, 2012). Procesos alternativos, como el compostaje, el ensilaje y la lombricultura, son más asequibles y sostenibles, pero su eficacia es limitada para gestionar grandes volúmenes de residuos del café.

La digestión anaeróbica (DA) es una tecnología que gestiona y valoriza residuos orgánicos, a través de un proceso de descomposición en ausencia de oxígeno, transformándolos en biogás (>50% CH₄) (Mendivelso, 2018) y en un lodo residual que puede usarse como enmendador de suelos degradados (M. González et al., 2015). La pulpa y las aguas mieles del proceso de beneficio de café presentan alto contenido de materia orgánica (132.9 gSV/kg y 18.9 gSV/kg, respectivamente) (Houbron et al., 2007; Torres-Valenzuela et al., 2019); por consiguiente, se consideran sustratos atractivos para su tratamiento mediante DA.

La DA impulsa la generación de energía descentralizada y promueve un enfoque económico circular en el sector agroindustrial. Sin embargo, la aplicación de la pulpa y las aguas mieles en la DA se ha visto limitada por dos factores: i) las aguas mieles tienen un pH ácido (3-4), inadecuado para su tratamiento individual en monodigestión anaeróbica (MonoDA) y ii) la pulpa contiene sustancias tóxicas (polifenoles) (Jayachandra et al., 2011) y su naturaleza lignocelulósica

dificulta la disponibilidad de carbono para las bacterias del proceso (Gómez Salcedo et al., 2021). Una estrategia que permite abordar las limitaciones mencionadas anteriormente es la co-digestión anaeróbica (CoDA), que consiste en el tratamiento simultáneo de dos o más sustratos con el fin de aprovechar la sinergia de nutrientes de los sustratos (García, 2009) para mejorar la producción de metano y la estabilidad del proceso con relación al contenido de AGV (Tonanzi et al., 2021). El estiércol bovino, residuo común en las fincas agrícolas del país, se ha usado ampliamente en la DA como regulador de acidez, debido a su capacidad buffer (Castro et al., 2017). Por lo tanto, las fincas cafeteras podrían adoptar sistemas sostenibles de gestión de residuos, por medio de la CoDA, al tratar simultáneamente aguas mieles y pulpa de café con estiércol bovino.

En el proceso de CoDA cada sustrato aporta un nutriente diferente (carbohidrato, lípido y proteína). El buen rendimiento de CoDA se obtiene cuando los cosustratos interactúan sinérgicamente, aportando cada uno de ellos las cantidades requeridas de sus propios nutrientes. La sinergia de cosustratos se estudia con base en el potencial de biometanización (PBM) de diferentes mezclas de cosustratos a escala laboratorio (operación batch) (Marin-Batista et al., 2016). En el caso específico de la CoDA de la pulpa de café (P) y aguas mieles (AM) con estiércol bovino (EB), Guerrero & Ocampo (2023) encontraron que la relación de mezcla que presenta el mejor efecto sinérgico entre los sustratos era de 66AM:17P:17EB (% SV), con una máxima producción de metano de $629 \pm 9 \text{ NL}_{\text{CH}_4}/\text{kgSV}$. Este rendimiento es superior comparado con los obtenidos para cada sustrato en MonoDA (563, 318 y 328 $\text{NL}_{\text{CH}_4}/\text{kgSV}$, para las AM, la P y el EB, respectivamente). Estos resultados indican que la CoDA con residuos del café tiene gran potencial de mejorar la producción de biogás. No obstante, Tonanzi et al. (2021) señalan que los resultados de estudios de CoDA en operación batch no son transferibles a operaciones a gran escala debido a que se presentan limitaciones relacionadas con la estabilidad y rendimiento del bioproceso. Por lo

anterior, sugieren la implementación de una etapa intermedia como la operación semicontinua a escala piloto.

La transferencia tecnológica de la CoDA a las fincas cafeteras podría realizarse mediante la implementación de biorreactores tubulares de polietileno, que son los sistemas más utilizados por el alcance económico para las comunidades rurales (De la Torre, 2008). Sin embargo, la mezcla sinérgica de pulpa y aguas mieles con estiércol bovino no ha sido estudiada en operación semicontinua en un biorreactor tubular. Por lo que, para su aplicación a gran escala, es necesario realizar ensayos en biodigestores en operación semicontinua, teniendo en cuenta las variables ingenieriles del proceso (carga de alimentación, tiempo de retención hidráulico, producción y calidad de biogás). Estos ensayos brindarán un mejor diagnóstico sobre la factibilidad de la co-digestión anaeróbica como alternativa para la gestión de residuos en las fincas cafeteras del país.

Teniendo en cuenta lo anterior, el propósito de esta investigación fue determinar la viabilidad de la co-digestión anaeróbica de aguas mieles y pulpa de café con estiércol bovino, en un biodigestor tubular en operación semicontinua a escala laboratorio, para sentar base en la generación de energía a partir del tratamiento de estos residuos, además de plantear una estrategia que permita la aplicación del proceso a escala rural, fortaleciendo la independencia energética de las fincas cafeteras.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar la viabilidad de la co-digestión anaeróbica de la mezcla de los residuos de la cadena agroindustrial del café (aguas mieles y pulpa), con estiércol bovino en un biodigestor tubular a escala laboratorio.

1.2 Objetivos Específicos

- Evaluar la estabilidad y eficiencia operacional de la co-digestión anaeróbica de la mezcla de aguas mieles, pulpa de café y estiércol bovino en un biodigestor tubular, bajo diferentes velocidades de carga orgánica.
- Plantear una alternativa de implementación del proceso de co-digestión anaerobia de la mezcla de aguas mieles, pulpa de café y estiércol bovino en una finca cafetera.

2. Marco referencial

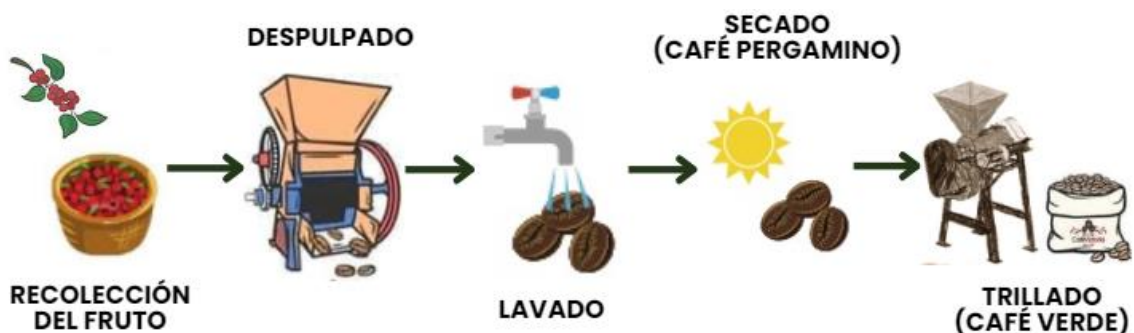
2.1 Beneficio del café

El beneficio del café es un proceso agroindustrial en el que se separan las partes del fruto y se seca el grano para su conservación, y posterior comercialización. Existen dos métodos para llevar a cabo este proceso: la vía seca y la vía húmeda. En Colombia, el beneficio húmedo es el proceso utilizado tradicionalmente por los caficultores (Quintero, 2000).

El beneficio húmedo del café involucra una serie de operaciones que tienen como objetivo la transformación de la cereza del café en café verde. Este proceso inicia con la recolección del fruto del café, seguido de una etapa donde se le retira la pulpa. Después del despulpado, el grano se encuentra recubierto de mucílago y se deposita en tanques para su fermentación. Mediante un lavado intensivo, utilizando considerables cantidades de agua (20-30 L/kg café pergamino seco) (Zambrano & Isaza, 1994), se separan los compuestos dulces del grano. Posteriormente, el grano es secado con el objetivo de disminuir el contenido de humedad desde un 55% hasta un 10-12%, generando así el café pergamino seco (Tellez Reyes & Vega Buitrago, 2012). Finalmente, el pergamino se retira a través de un proceso de trillado o descascarado, para obtener el café verde (Cedicafé, 2018).

Figura 1

Etapas del proceso de beneficio húmedo del café



Del beneficio húmedo del café se generan gran cantidad de residuos orgánicos conocidos como pulpa y aguas mieles. Estos residuos han generado gran interés, dado su impacto negativo en el medio ambiente al ser dispuestos sin tratamiento previo (Rodríguez et al., 2013). La pulpa y las aguas mieles se caracterizan por tener un alto contenido de materia orgánica (Hernández et al., 2016). A pesar de que en la actualidad estos residuos se utilizan en compostaje, alimento para ganado, abonos e incluso en la elaboración de materiales de construcción, es imperativo explorar aplicaciones más eficientes, enfocadas en la sostenibilidad del sector agrícola.

Las aguas mieles, en específico, presentan un 90% de materia orgánica ($SV/ST = 0.9$) y un alto contenido de carbohidratos (83% base seca), constituidos principalmente por azúcares reductores, que facilitan su biodegradación y fermentación natural (Acarley & Quipuzco, 2020). Por otro lado, la pulpa de café, con un contenido orgánico superior al 90%, es un residuo sólido rico en fibra (20%), proteínas (7.5-15%) y carbohidratos (32-50%) que puede ser tratado a través de la acción de microorganismos anaeróbicos (Esquivel & Jiménez, 2012; Martínez-Alemán et al., 2019). De esta manera, junto con la relación C/N para aguas mieles (15-20) y pulpa de café (18-30), se manifiestan indicadores sólidos que sugieren la aplicación de la digestión anaeróbica para la gestión eficiente de ambos residuos (Acarley & Quipuzco, 2020).

2.2 Digestión y co-digestión anaeróbica

La digestión anaeróbica es un proceso biológico, en el que la materia orgánica es degradada a través de cuatro etapas principales: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Morales et al., 2018). La aplicación de la digestión anaeróbica, en el tratamiento de residuos orgánicos, presenta beneficios significativos como la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, la generación de energía renovable (biogás) y la producción de biofertilizantes (digerido) (Sarabia et al., 2017).

Ahora bien, es importante tener en cuenta las fases de la digestión anaeróbica para comprender el proceso y sus limitaciones. En la hidrólisis, primera etapa del proceso, intervienen enzimas que descomponen las grandes moléculas orgánicas (carbohidratos, lípidos y proteínas) en moléculas más pequeñas (azúcares y aminoácidos). Luego, en la acidogénesis, por medio de bacterias anaerobias se transforma la materia hidrolizada en ácidos grasos volátiles (acético, propiónico, butírico, entre otros), hidrógeno, dióxido de carbono y alcoholes. Después, en la acetogénesis, los ácidos producidos en la acidogénesis son convertidos en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono. Finalmente, en la metanogénesis se transforman estos productos en metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) (S. Quintero, 2016).

La composición de los sustratos (residuos orgánicos) y las condiciones de operación pueden ser determinantes en el desarrollo del consorcio bacteriano, que interviene en cada etapa del proceso (Palau, 2016). Específicamente, en la digestión anaeróbica con los residuos agroindustriales del café (pulpa y aguas mieles) se deben tener en cuenta los siguientes aspectos: i) el alto contenido de azúcares reductores de las aguas mieles, transformados en ácidos grasos volátiles, pueden inhibir el proceso y ii) el contenido de celulosa, lignina y hemicelulosa de la pulpa de café dificulta su hidrólisis y disminuye la biodisponibilidad de materia orgánica soluble (Gómez Salcedo et al., 2021). Por lo tanto, la monodigestión de estos sustratos no es recomendable en términos de la cantidad de residuo a tratar y los rendimientos del proceso.

La co-digestión anaeróbica se presenta como una alternativa en la que se trabajan mezclas de dos o más sustratos orgánicos biodegradables, con el fin de aumentar el potencial de producción de biogás y la calidad nutricional del digerido (Arhoun, 2017). En la co-digestión anaeróbica se usa ampliamente el estiércol animal como complemento de la mezcla entre residuos orgánicos. Entre estos se destaca el estiércol bovino, residuo común en las fincas del país, que debido a su

alcalinidad ($4.1 \text{ gCaCO}_3/\text{L}$), superior a valores estándar ($1.5 \text{ gCaCO}_3/\text{L}$), presenta una buena capacidad buffer para su aplicación en la digestión anaeróbica (Bernal & Orozco, 2019). Esta propiedad del estiércol bovino es de utilidad para mantener el pH en un rango adecuado (6-8) dentro del digestor, ante las alteraciones que puede significar la adición de sustratos ácidos o alcalinos (Mendivelso, 2018).

En la co-digestión anaeróbica es necesario considerar variables de proceso que influyen de manera significativa en el rendimiento de los biodigestores. Por lo tanto, se deben asegurar las condiciones adecuadas para el desarrollo del proceso como la temperatura del entorno bajo régimen mesofílico ($25\text{-}40 \text{ }^\circ\text{C}$) y el pH estable dentro del digestor en un rango de 6.5-8 (M. González et al., 2015). Valores de pH inferiores a 4.5-5 indican inhibición en la actividad microbiana, causada por una carga orgánica excesiva y/o grandes fluctuaciones en la temperatura del sistema (Palau, 2016). De igual forma, es importante determinar la proporción adecuada de la mezcla de residuos, teniendo en cuenta las interacciones beneficiosas (efectos sinérgicos), así como la velocidad de carga orgánica (VCO) y el tiempo de retención hidráulico (TRH), con el propósito de asegurar una correcta degradación de los sustratos a tratar (Morales P. et al., 2018). En general, se sostiene que un mayor TRH (menor VCO) conduce a una digestión más efectiva de la materia orgánica (Palau, 2016).

El rendimiento del proceso, en términos de producción de biogás, depende de las características microbiológicas del inóculo utilizado, como la actividad metanogénica específica (AME) y la actividad hidrolítica (AH) (M. Quintero et al., 2012). La AH es la capacidad que tienen las bacterias del proceso en la degradación de fuentes complejas de carbono. Por otra parte, la AME está directamente relacionada con la capacidad del consorcio microbiano para transformar los AGV en acetato, que posteriormente es convertido en metano (Jaimes-Estévez et al., 2022).

Valores cercanos a 0.05 gDQO/gSV*d para la AH y 0.14 gDQO/gSV*d para la AME constituyen un inóculo apropiado para la degradación de residuos agroindustriales de naturaleza lignocelulósica (M. Quintero et al., 2012) como la pulpa de café.

2.3 Digestión anaeróbica con residuos agroindustriales del café

En las fincas cafeteras de Colombia, las personas suelen cocinar con leña o gas propano, debido a la falta de acceso a redes de gas natural. La leña es un combustible económico, pero su uso genera problemas ambientales, como la deforestación y la contaminación del aire (Beyene et al., 2014). El gas propano o GLP es más limpio, pero es más caro y difícil de transportar. La producción de biogás mediante digestión anaeróbica es una alternativa viable para la generación de energía renovable en las zonas rurales del país. Esta alternativa tiene el potencial de mitigar los impactos ambientales y económicos negativos del uso de leña y gas propano (Castro et al., 2017), así como de los residuos generados del beneficio del café.

Se han reportado estudios sobre la digestión anaeróbica de los residuos agroindustriales del café, sin embargo, son limitados y muy pocos se enfocan en el tratamiento simultáneo de la pulpa y las aguas mieles. Londoño (2017) realizó ensayos en un reactor PFR alimentado con pulpa de café y agua, usando como inóculo un lodo activado de aguas residuales, donde obtuvo rendimientos de hasta 93.83 L_{biogás}/kg de pulpa alimentada al reactor. Por su parte, Gómez et al. (2021) implementaron de la co-digestión anaeróbica de la pulpa de la cereza del café con estiércol bovino en condiciones mesófilas (37 °C), con rendimientos de metano de 259.8 mL_{CH₄}/gSV. Los autores recomiendan no operar sistemas digestores con valores de VCO mayores a 0.5 kgSV/m³_{op}*d en el tratamiento de residuos de la cadena agroindustrial del café.

Adicionalmente, se han realizado estudios de la co-digestión anaeróbica utilizando aguas mieles y pulpa de café con estiércol bovino en biodigestores a escala batch. Balseca & Cabrera

(2011) realizaron ensayos con una proporción de mezcla de 20% estiércol, 20% aguas mieles y 40% pulpa de café, obteniendo un potencial de producción promedio de biogás de 0.03 m³/d, para un tiempo de retención (TRH) de 47 días. Sin embargo, la determinación de la relación de mezcla probada no fue analizada en detalle para ser considerada como óptima en la gestión y valorización de estos residuos. Tafur (2023) llevó a cabo la aplicación de la co-digestión a escala campo de aguas mieles y pulpa del café con estiércol bovino en un biodigestor de 12 m³, a una temperatura de 25 °C. El sustrato alimentado fue de 200 L/d, de los cuales 50 L corresponden a estiércol bovino, 16 L a las aguas mieles, 1.5 Kg de pulpa y el restante (132.5 L) en agua. Se utilizó un agente externo (carbonato de calcio) como regulador de acidez y estabilizador del pH dentro del biodigestor, debido a las dificultades de implementar la CoDA ternaria sin una adecuada transición en la mezcla a digerir. Como resultado, obtuvo un rendimiento de biogás de 0.26 m³/d. De igual forma, la mezcla alimentada no fue optimizada y su requerimiento diario de agua exhibe una desventaja clara en la sostenibilidad del proceso.

Teniendo como prioridad la revalorización y gestión de estos residuos en conjunto, se realizó un estudio basado en ensayos de potencial de biometanización (PBM) y sinergia de rendimientos donde se encontró que la proporción de mezcla más favorable en la co-digestión anaeróbica, en términos de sólidos volátiles, fue de 66% aguas mieles, 17% pulpa de café y 17% estiércol bovino (Guerrero & Ocampo, 2023). En ese sentido, el objetivo de este trabajo de grado fue evaluar la viabilidad de la co-digestión anaeróbica de las aguas mieles y pulpa de café con estiércol bovino, implementando esta relación de mezcla en un biodigestor a escala laboratorio en operación semicontinua con el propósito de proyectar su aplicación a escala rural.

3. Metodología

El desarrollo experimental de la CoDA de aguas mieles y pulpa de café con estiércol bovino a escala laboratorio se llevó a cabo en dos etapas: a) La primera, contempló la evaluación de la estabilidad y eficiencia operacional del proceso, a dos diferentes velocidades de carga orgánica (0.5 y 1 kgSV/m³_{op}*d) y b) en la segunda etapa, se planteó una alternativa para la implementación del proceso anaerobio en un biodigestor a escala rural en una finca cafetera.

3.1 Evaluación de la estabilidad y eficiencia operacional de la co-digestión anaeróbica

3.1.1 Determinación de las condiciones de operación del proceso

Los sustratos (aguas mieles, pulpa y estiércol bovino) fueron obtenidos de una finca cafetera ubicada en Piedecuesta - Santander (latitud 6°57'20''N; longitud 72°59'14''O). Estos residuos fueron caracterizados en términos de su contenido de materia orgánica con el propósito de determinar la composición de alimento para el digestor. En la tabla 1 se presenta la caracterización de los sustratos utilizados.

Tabla 1

Caracterización de sustratos

Parámetro	Unidad	Aguas mieles	Pulpa de café	Estiércol bovino
Sólidos Totales (ST)	g/kg	18.77 ± 0.26	206.85 ± 12.43	151.33 ± 5.89
Sólidos Volátiles (SV)	g/kg	16.54 ± 0.28	185.67 ± 3.99	119.49 ± 0.38
pH	-	3.95	4.21	8.10
Demanda Química de Oxígeno Total (DQOt)	gDQO/L	24.50 ± 0.23	-	23.33 ± 1.88
Demanda Química de Oxígeno Soluble (DQOs)	gDQO/L	8.91 ± 0.17	-	1.20 ± 0.18
Ácidos grasos volátiles (AGV)	mg Ac. acético/L	2160	-	520 ± 69.28

Valor promedio ± DE, n = 3.

Los datos se expresan en peso húmedo.

Los resultados indicaron que tanto la pulpa como el estiércol bovino son sustratos con un alto contenido de materia orgánica en términos de sólidos volátiles. Sin embargo, la pulpa de café es un residuo compuesto (en base seca) por lignina (12.7%), celulosa (15.12%) y hemicelulosa (2.91%) (Anzola et al., 1989), que dificultan su degradación biológica en sistemas anaerobios. Por otro lado, las aguas mieles se caracterizaron por ser un sustrato principalmente líquido, y presentó un 36.36% de materia orgánica soluble, relacionada con su alto contenido de ácidos grasos volátiles (2160 mg Ac. Acético/L). Esta materia orgánica es de fácil degradación y bioconversión a metano, pero podría representar la inhibición temprana del sistema de DA. Adicionalmente, el pH de las aguas mieles (3.95) y de la pulpa (4.21) no se encuentran en un rango adecuado para la operación de biodigestores. Por lo anterior, el estiércol bovino es un sustrato complementario necesario porque aporta alcalinidad (pH = 8.1) al sistema, regulando la carga ácida de las aguas mieles y de la pulpa.

La CoDA se realizó en dos biorreactores tubulares de policloruro de vinilo (PVC), cada uno con volumen total de 8.6 L, y volumen de operación de 6 L. Debido a que los sustratos tratados presentan altas concentraciones de materia orgánica, las velocidades de carga orgánica evaluadas en cada digester fueron de 0.5 y 1 kgSV/m³_{op}*d. Estos valores son sugeridos para reactores que tratan sustratos con alto contenido de materia orgánica fácilmente biodegradable (Jaime Estévez, y otros, 2022).

El tiempo de retención de hidráulico (TRH) se estableció en función de la velocidad de carga orgánica (VCO) y se determinó de acuerdo con la ecuación 1.

$$TRH = \frac{\rho_{alimento}}{VCO * \sum \frac{f_k}{[SV]_k}} \quad (\text{Ec } 1)$$

Donde,

k = Sustratos (pulpa, aguas mieles, estiércol bovino)

TRH = Tiempo de retención hidráulico (d)

ρ_{alimento} = Densidad del alimento (kg/m³)

VCO = Velocidad de Carga Orgánica (kgSV/m³_{op}*d)

f_k = Fracción de alimento de sustrato

SV = Sólidos volátiles de sustrato (gSV/kg)

El tiempo de retención hidráulico fue estimado en 24 y 47 días para la VCO de 1 y 0.5 kgSV/m³_{op}*d, respectivamente. Los flujos máxicos de las aguas mieles, pulpa de café y estiércol bovino se definieron según la ecuación 2.

$$\dot{m}_k = \frac{f_k * VCO * V_{op}}{[SV]_k} \quad (\text{Ec } 2)$$

Donde,

k = Sustratos (pulpa, aguas mieles, estiércol bovino)

\dot{m}_k = Flujo máxico de sustrato (kg/d)

f_k = Fracción de alimento de sustrato

VCO = Velocidad de Carga Orgánica (kgSV/m³_{op}*d)

V_{op} = Volumen de operación del digestor (m³)

SV = Sólidos volátiles de sustrato (gSV/kg)

La fracción de alimento de los sustratos se realizó con base en su contenido de sólidos volátiles. Una vez se establecieron los flujos máxicos de sustrato, se definió una dieta de alimentación con el fin de alcanzar gradualmente la relación de mezcla de 66AM:17P:17EB (%SV) establecida por Guerrero & Ocampo (2023), quienes reportaron que está presenta una

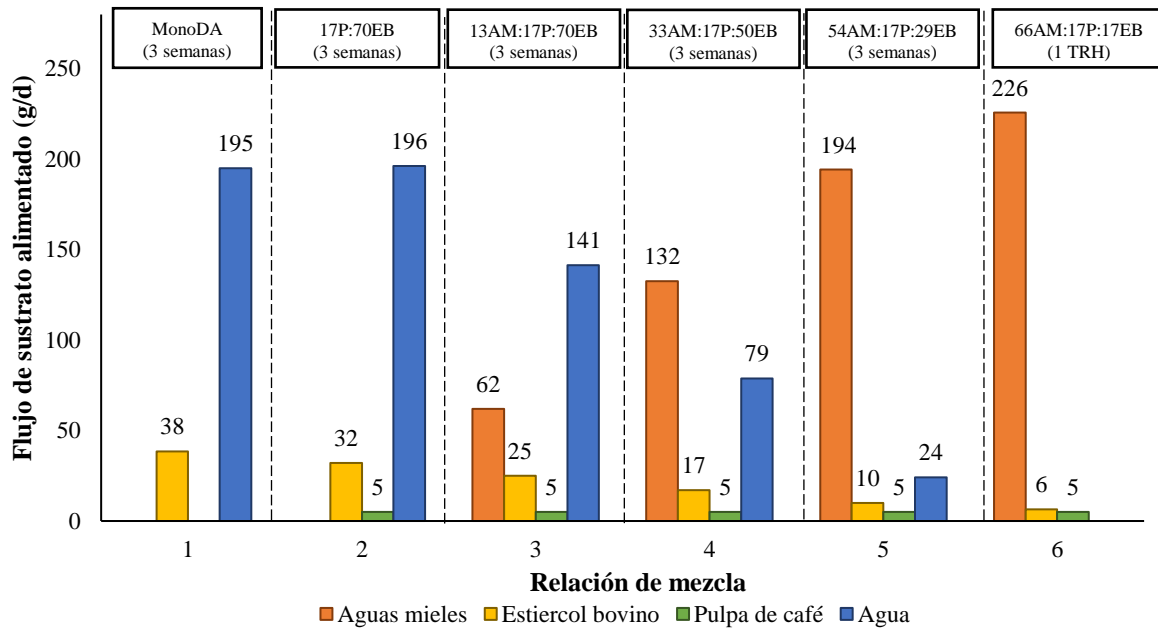
mayor sinergia de rendimiento y potencial de biometanización en la co-digestión anaeróbica de aguas mieles y pulpa con estiércol bovino, en operación batch a condiciones mesofílicas.

Con la caracterización de los sustratos en términos de sólidos volátiles, el volumen de operación del digestor, la VCO y la relación de mezcla objetivo, se calcularon los flujos de sustratos a alimentar. Para alimentar a los digestores con el flujo obtenido, se planteó una agenda de alimentación progresiva. Para operar el biodigestor y conseguir su estabilización es recomendable iniciar la operación de carga con la monodigestión del estiércol bovino diluido con agua en relación 1:3 (v/v). Esta relación se ha determinado como óptima para asegurar una actividad microbiana adecuada (Martí-Herrero, 2008). Una vez la producción de biogás es estable se pasa a una CoDA binaria con pulpa y estiércol en relación 17P:83EB. El flujo másico de pulpa se mantuvo constante a lo largo del proceso debido a que era el sustrato suministrado en menor cantidad. Debido al elevado contenido de materia orgánica fácilmente degradable presente en las aguas mieles y su potencial inhibidor en los digestores, se decidió introducir gradualmente este sustrato en el proceso. Por esto, se inició la CoDA ternaria con una relación de mezcla de 13AM:17P:70EB, hasta llegar a la mezcla objetivo de 66AM:17P:17EB, como se ilustra en la figura 2. Además, se presentan los tiempos estipulados para la alimentación de cada relación de mezcla, con el fin de garantizar al menos un TRH con la mezcla de 66AM:17P:17EB, para ambas velocidades de carga orgánica.

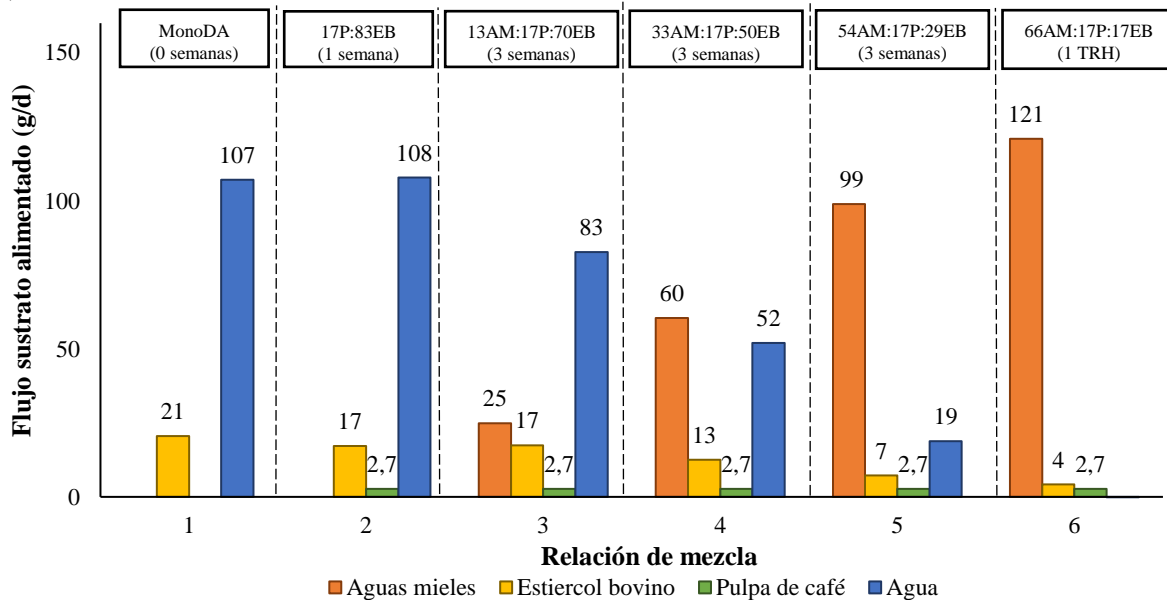
Figura 2

Dieta de alimentación para la VCO de a) $1 \text{ kgSV/m}^3_{op} * d$ y b) $0.5 \text{ kgSV/m}^3_{op} * d$

a)



b)



En las gráficas se observa cómo se fue reemplazando y reduciendo el diluyente agua por el cosustrato aguas mieles, con el objetivo de proporcionar al consorcio microbiano un periodo

adecuado de adaptación a los cosustratos aguas mieles y pulpa. La MonoDA de estiércol bovino se omitió al operar con la VCO de $0.5 \text{ kgSV/m}^3_{\text{op}}*\text{d}$, debido a que el inóculo está adaptado a este tipo de alimentación. Asimismo, con respecto a la segunda relación de mezcla (17P:83EB), se consideró una reducción en el tiempo de alimentación dado que la pulpa con la VCO de $0.5 \text{ kgSV/m}^3_{\text{op}}*\text{d}$ se suministra en menor cantidad al digester en comparación con la VCO de $1 \text{ kgSV/m}^3_{\text{op}}*\text{d}$, por lo que su asimilación es menos compleja para el biodigestor.

3.1.2 Monitoreo del proceso de co-digestión anaerobia

Se usó como inóculo un lodo anaerobio de estiércol bovino, proveniente de un biodigestor tubular de bajo costo. Este biodigestor ha sido operado durante aproximadamente un año, y es alimentado diariamente con estiércol bovino y agua en relación 1:3 (v/v). Las características del inóculo se presentan en la tabla 2.

Tabla 2

Caracterización fisicoquímica y bioquímica del inóculo

Parámetros	Unidad	Valor
Sólidos Volátiles (SV)	gSV/kg	32.46 ± 0.35
Actividad Metanogénica Específica (AME)	gDQO/gSV*d	0.081 ± 0.002
Actividad Hidrolítica (AH)	gDQO/gSV*d	0.086 ± 0.004
Ácidos grasos volátiles (AGV)	mg Ac. acético/L	440 ± 183.30
pH	-	7.44 ± 0.07
Capacidad Buffer	mg Ac. Acético/mg CaCO_3	0.4 ± 0.17

Se evaluó la demanda química de oxígeno (DQO), en el afluente y en el efluente del biodigestor, una vez en cada relación de mezcla. El pH, la alcalinidad total (AT) y los ácidos grasos volátiles (AGV), se midieron una vez por cada relación de mezcla para el afluente y semanalmente

en el efluente. La DQO se determinó siguiendo el protocolo 5220 D propuestos por la APHA 2017. La concentración de AGV y AT se cuantificó mediante titulación, siguiendo el procedimiento descrito por Jobling y otros (2014). El pH se midió utilizando un electrodo de vidrio. La producción de biogás se registró diariamente y su calidad (%CH₄) se determinó por cromatografía de gases, usando un cromatógrafo SRI 8610C equipado con detector TCD.

3.2 Desarrollo del plan para la aplicación del proceso de co-digestión anaerobia en un biodigestor a escala rural.

La factibilidad de la implementación del proceso en campo se realizó mediante un diagnóstico a una finca cafetera ubicada en la vereda Miraflores, Piedecuesta, Santander (latitud 6°57'20''N; longitud 72°59'14''O, 1920-1931 msnm, temperatura promedio 21 °C).

En el caso de estudio se consideró el volumen de residuos generados por la finca, durante el beneficiado del café, tratados mediante digestión anaerobia en cada etapa del año, así como la integración de otras tecnologías de bajo costo para el aprovechamiento total de estos residuos mediante un modelo de economía circular.

Se realizó una evaluación económica de la implementación de la CoDA de aguas mieles y pulpa con estiércol bovino en un biodigestor de 6 m³ a escala rural mediante un análisis CAPEX-OPEX (Salevsky, 2019), teniendo en cuenta los costos de instalación, puesta en marcha y mantenimiento del biodigestor, así como los beneficios económicos derivados de la producción de biogás. A partir del anterior análisis se calcularon indicadores financieros como el valor presente neto (VPN), la tasa interna de retorno (TIR) y el periodo de recuperación de la inversión (PRI).

4. Resultados

4.1 Estabilidad y eficiencia de la CoDA con residuos agroindustriales del café

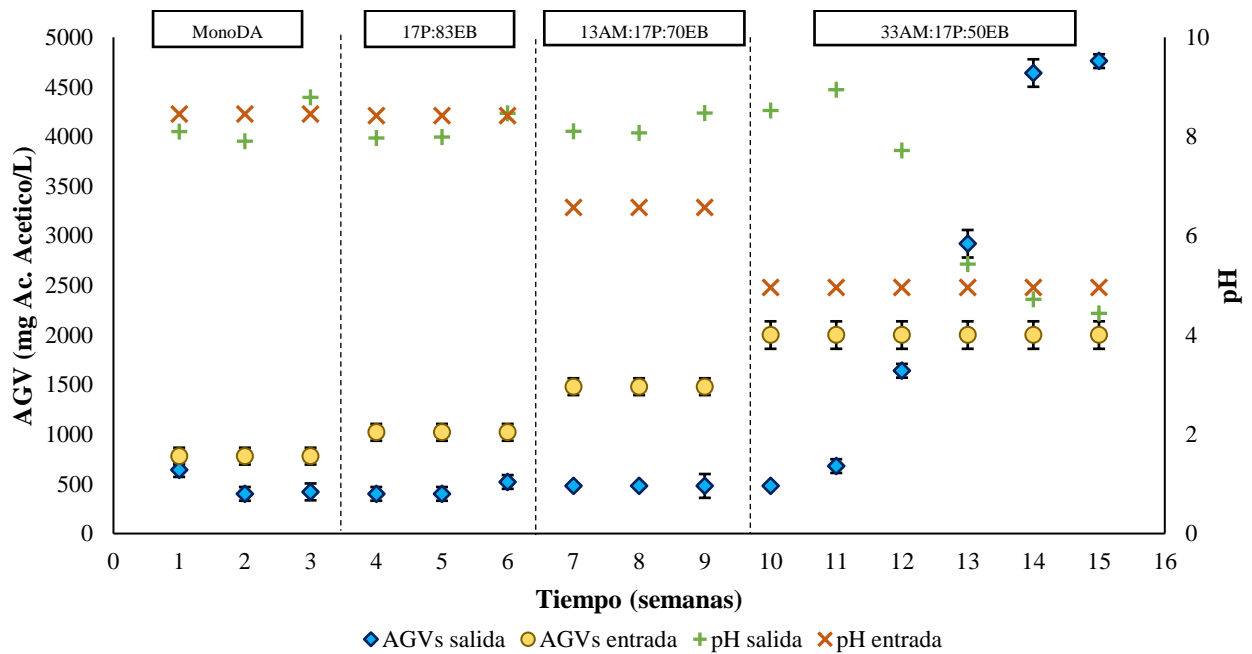
4.1.1 Monitoreo del proceso de co-digestión anaeróbica

La figura 3 presenta la concentración de AGV y el pH del afluente y del efluente, respectivamente, para VCO de $1 \text{ kgSV/m}^3_{\text{op}} \cdot \text{d}$ y $0.5 \text{ kgSV/m}^3_{\text{op}} \cdot \text{d}$ en función del tiempo.

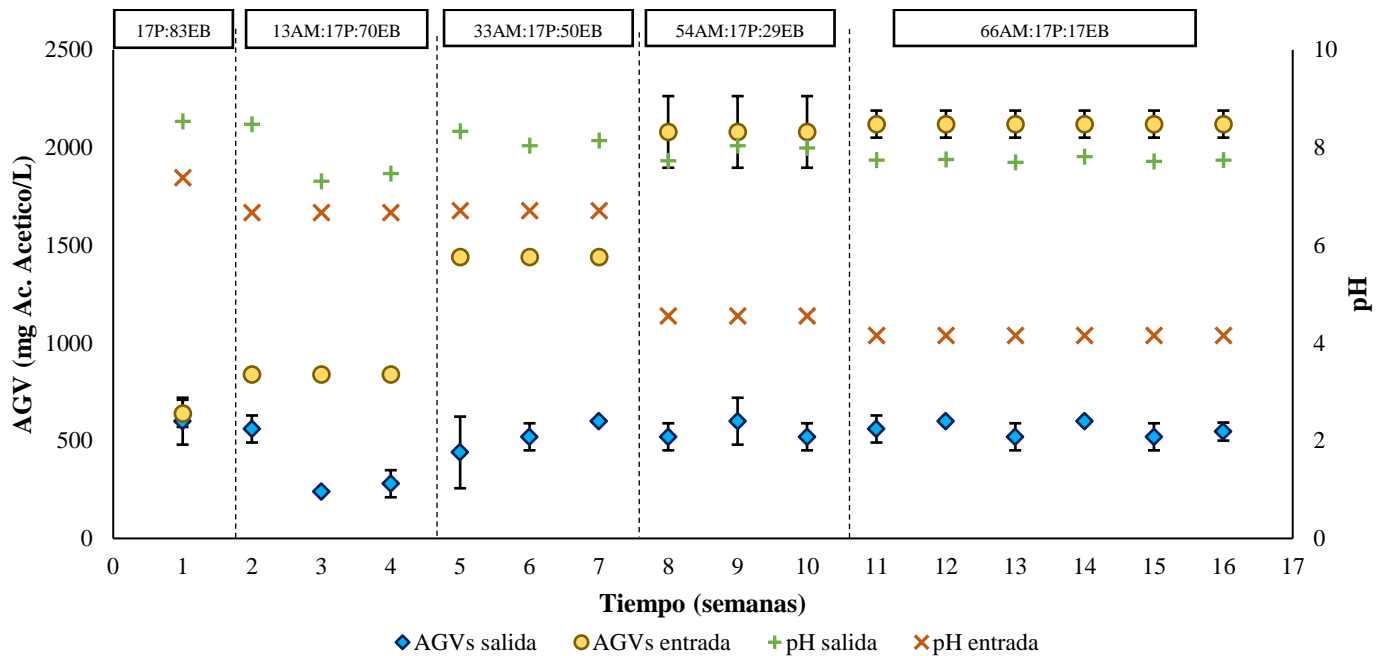
Figura 3

Concentración de AGV y pH en función del tiempo de monitoreo a velocidades de carga orgánica de a) $1 \text{ kgSV/m}^3_{\text{op}} \cdot \text{d}$ y b) $0.5 \text{ kgSV/m}^3_{\text{op}} \cdot \text{d}$

a)



b)



En el monitoreo de los digestores, se evidenció un incremento significativo en la concentración de AGV en el alimento a medida que la proporción de aguas mieles se elevaba. Para la VCO de $1 \text{ kgSV/m}^3_{\text{op}} \cdot \text{d}$, la concentración de AGV en el alimento aumentó gradualmente desde 780 ± 84.85 hasta 2000 ± 138.56 mg Ac acético/L, como se observa en la figura 3a. Este comportamiento fue similar en la VCO de $0.5 \text{ kgSV/m}^3_{\text{op}} \cdot \text{d}$, donde la concentración de AGV en el alimento pasó de 600 a 2120 ± 69.28 mg Ac acético/L durante el tiempo monitoreado. Sin embargo, en la VCO de $0.5 \text{ kgSV/m}^3_{\text{op}} \cdot \text{d}$ fue posible alimentar la relación de mezcla objetivo (66AM:17P:17EB). Respecto al pH en el alimento, disminuyó con el incremento del flujo de aguas mieles, alcanzando valores de 4.97 y 4.15 para la VCO 1 y $0.5 \text{ kgSV/m}^3_{\text{op}} \cdot \text{d}$, respectivamente. Lo anterior, es consistente con la carga de AGV alimentados al proceso.

Para un correcto funcionamiento de un digestor tubular, la concentración de AGV dentro del sistema no debe ser superior a 1500 mg Ac. Acético/L (Angelidaki et al., 2005).

Adicionalmente, la capacidad buffer debe estar por debajo de 0.6 mg Ac. Acético/ mg CaCO₃ (Castro et al., 2017) soportada en valores de pH dentro del rango 6.5-8 en el efluente del digestor.

Durante el proceso, la concentración promedio de AGV en el efluente se mantuvo por debajo del límite de inhibición con un valor de 484.61 ± 87.23 mg Ac. Acético/L cuando la VCO fue de $1 \text{ kgSV/m}^3_{\text{op}}*\text{d}$ y la proporción de mezcla fue de 33AM:17P:50EB. A partir de esa relación de mezcla, la concentración de AGV superó el límite de inhibición, alcanzando valores de hasta 4760 ± 69.28 mg Ac. Acético/L. Teniendo en cuenta lo anterior, la elevada concentración de ácido acético dentro del sistema indica la inhibición del proceso. Por lo tanto, se infiere que se produjo una reducción de la actividad metanogénica (Jaimes Estévez, y otros, 2022). En consecuencia, se suspendió la operación del digestor. Los valores promedios de la capacidad buffer y el pH en el cierre del proceso fueron de 1.05 ± 0.14 y 4.42, respectivamente.

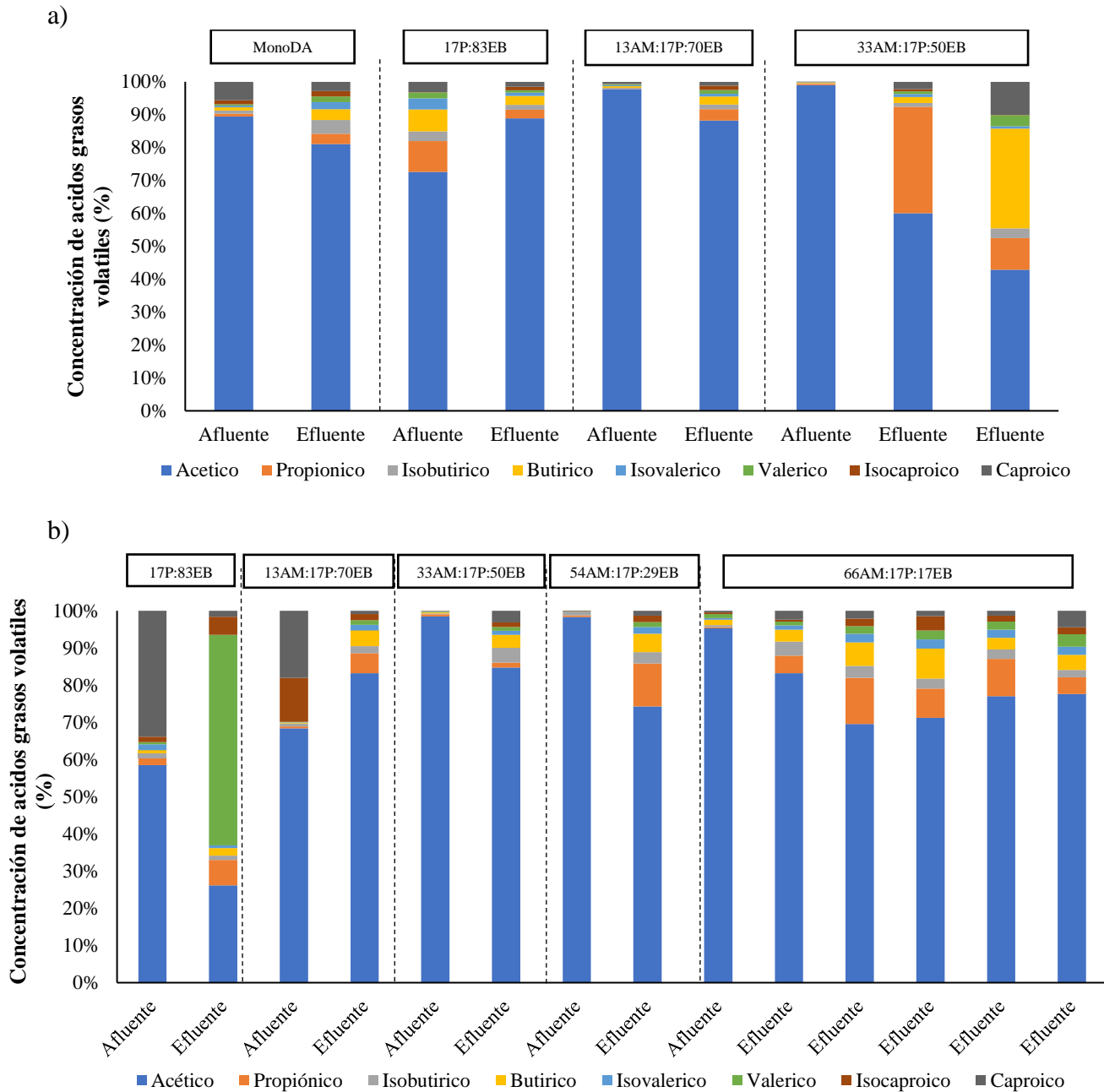
Durante la operación con una VCO de $0.5 \text{ kgSV/m}^3_{\text{op}}*\text{d}$, el digestor registró una concentración de ácidos promedio de 512 mg Ac. Acético/L a lo largo de todo el proceso. Los resultados no indicaron ningún riesgo de inhibición por AGV mientras se realizó el monitoreo. A pesar de la alta concentración de AGV y el bajo pH alimentado, el digestor logró estabilizar la acidez, manteniendo el pH del efluente dentro de los parámetros recomendados. El valor promedio de capacidad buffer fue de 0.35 mg Ac. Acético/ mg CaCO₃, con un pH de 7.92 en el efluente. Se infiere que operar un digestor a una VCO de $0.5 \text{ kgSV/m}^3_{\text{op}}*\text{d}$ es adecuado para la CoDA de aguas mieles y pulpa con estiércol bovino, debido a que se alcanzó la relación de mezcla objetivo.

La concentración de cada ácido graso volátil en el afluente y efluente durante el tiempo de operación se determinó mediante cromatografía de gases. Las concentraciones de cada ácido se presentan en la figura 4.

Figura 4

Concentración de AGV por cromatografía de gases a diferentes velocidades de carga orgánica

a) $1 \text{ kgSV/m}^3_{op} \cdot d$ y b) $0.5 \text{ kgSV/m}^3_{op} \cdot d$



El ácido acético y el ácido butírico son los AGV más favorables para la producción de metano (Wijekoon et al., 2011). En este estudio, la concentración de ácido acético fue del 89,7%

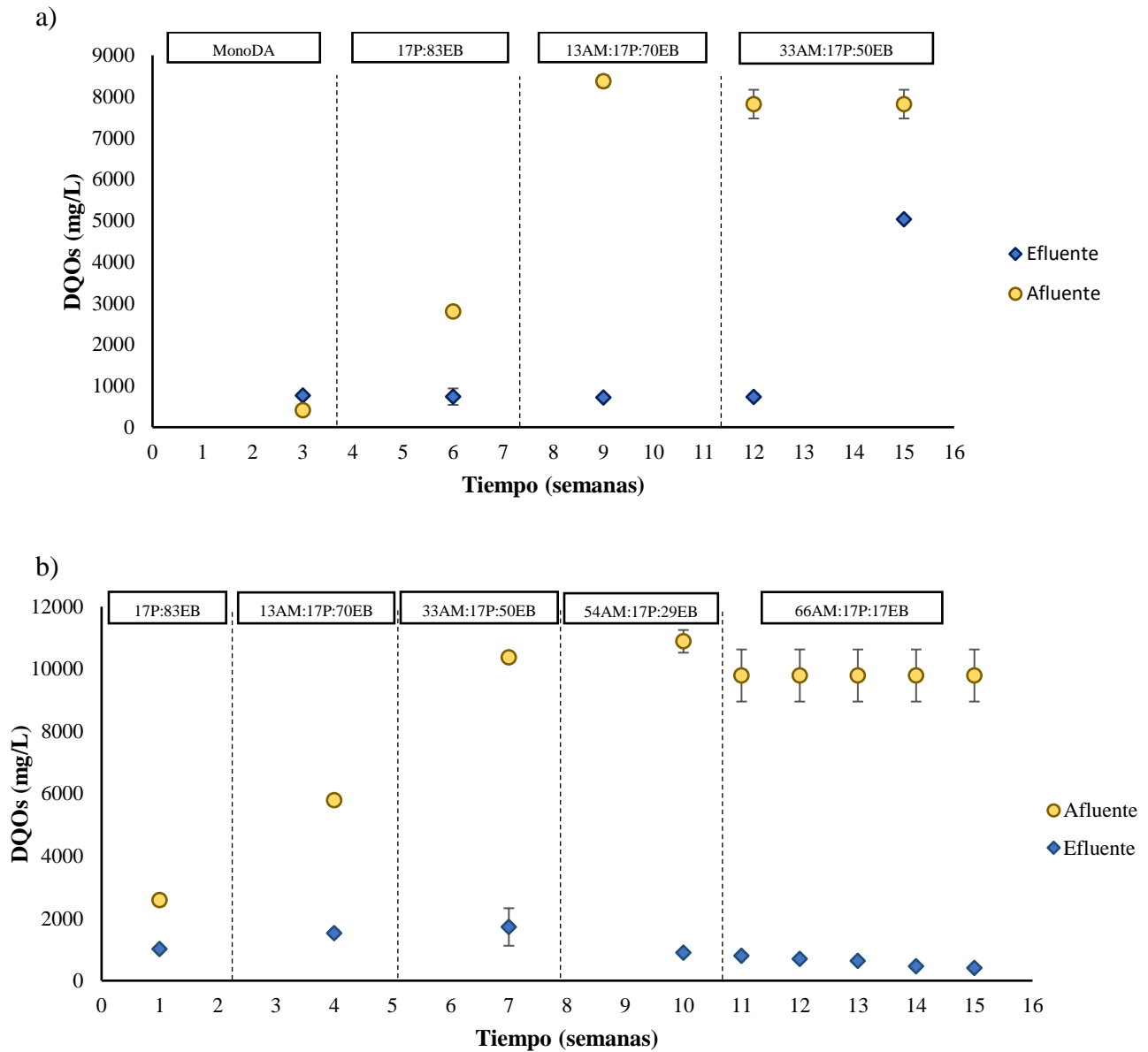
y del 83,8% para la VCO de 1 y 0.5 kgSV/m³_{op}*d, respectivamente, por lo cual se deduce que la producción de metano se dio principalmente a partir del ácido acético.

La relación P/A (Acido propiónico/ ácido acético) y el contenido de ácido acético permiten evaluar la estabilidad de un digestor. Valores de P/A > 1.4 y concentraciones de ácido acético ≥ 800 mg/L, indican un fallo inminente del digestor (Hill et al., 1987). En cuanto a los digestores operados a VCO de 1 y 0.5 kgSV/m³_{op}*d, la relación P/A fue inferior a 1.4, por lo que no se produjo inhibición por ácido propiónico. Sin embargo, cuando la relación de mezcla fue de 33AM:17P:50EB, para la VCO de 1 kgSV/m³_{op}*d, el efluente del digestor tenía concentración de ácido acético de 1115.41 mg/L. Algunas investigaciones reportan que una concentración de 15 mg/L de ácido isobutírico e isovalérico en el efluente indican problemas en el biodigestor, como la formación de espuma o la ineficiencia en la conversión de metano (Hill & Bolte, 1989). Cuando la relación de mezcla fue de 33AM:17P:50EB, las concentraciones de ácido isobutírico e isovalérico en el efluente, con la VCO de 1 kgSV/m³_{op}*d, fueron de 77,87 mg/L y 18,05 mg/L, respectivamente, evidenciando la inhibición del proceso.

Adicionalmente, la demanda química de oxígeno soluble (DQOs) se consideró como parámetro del contenido de materia orgánica soluble durante el proceso. Se realizaron pruebas tanto en el afluente como en el efluente del biodigestor a ambas velocidades de carga orgánica. Los resultados se presentan en la figura 5.

Figura 5

*Seguimiento a la demanda química de oxígeno soluble en función del tiempo de monitoreo a velocidades de carga orgánica de a) 1 kgSV/m³_{op}*d y b) 0.5 kgSV/m³_{op}*d*



La DQO permite conocer y seguir la estabilidad del proceso en cuanto al contenido orgánico que se logra remover, con relación al alimentado, a través de la co-digestión anaeróbica. Al operar con una velocidad de carga orgánica baja ($VCO = 0.5 \text{ kgSV/m}^3_{op} \cdot \text{d}$) se obtuvo una remoción de materia orgánica más efectiva que con una velocidad alta ($VCO = 1 \text{ kgSV/m}^3_{op} \cdot \text{d}$). Con la VCO de $1 \text{ kgSV/m}^3_{op} \cdot \text{d}$, no hubo remoción de materia orgánica sino hasta la relación de mezcla de 17P:83EB con un 73.66%, y alcanzó valores de 91.38% y 90.62%, para la relación de

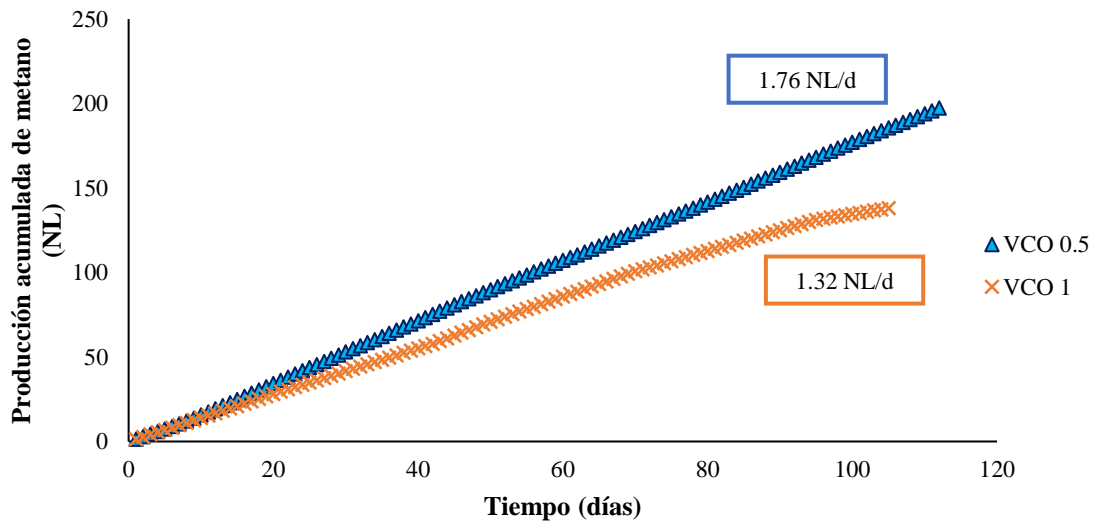
mezcla de 13AM:17P:70EB y de 33AM:17P:50EB, respectivamente. No obstante, la remoción de materia orgánica se redujo a un 35.63%. En contraste, para la VCO de $0.5 \text{ kgSV/m}^3_{\text{op}}*\text{d}$, se lograron valores de remoción de materia orgánica del 60.86% con la relación de mezcla de 17P:83EB. La eficiencia en la eliminación de materia orgánica aumentó de manera progresiva con cada relación de mezcla, alcanzando un 95.82% para la relación de mezcla objetivo (66AM:17P:17EB).

En promedio, para el biodigestor operado con VCO de $0.5 \text{ kgSV/m}^3_{\text{op}}*\text{d}$ el contenido de materia orgánica soluble a la salida fue de $907 \pm 451.93 \text{ mgDQO/L}$. Con la VCO de $1 \text{ kgSV/m}^3_{\text{op}}*\text{d}$, el promedio se mantuvo en $741.67 \pm 21.52 \text{ mgDQO/L}$ hasta la inhibición del reactor en la relación de mezcla de 33AM:17P:50EB, con un contenido de materia orgánica soluble de 5033.33 mgDQO/L . Por otro lado, las concentraciones obtenidas para la DQOt del efluente estuvieron alrededor de 13000 mgDQO/L en ambas velocidades de carga orgánica, superando los límites permitidos (650 mgDQO/L) para vertimientos puntuales a cuerpos de agua y sistemas de alcantarillado derivados del beneficio del café (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015). Por lo tanto, es necesario un postratamiento al efluente con el fin de disminuir su carga orgánica. Los valores de DQOt obtenidos en el efluente fueron similares a los reportados por Salazar (2019), con una DQOt de 19250 mgDQO/L en la digestión de aguas mieles con estiércol bovino. Por su parte, Tafur (2023) reportó una DQOt de 20317 mgDQO/L en la CoDA de pulpa de café y aguas mieles con estiércol bovino, en un digestor a escala rural alimentado con una carga de 200 L/d para una relación de mezcla en %v/v de 8AM:0.8P:25EB y 66.2% en agua.

4.1.2 Rendimiento del proceso de co-digestión anaeróbica

Figura 6

Producción de metano acumulada durante la CoDA de pulpa y aguas mieles con estiércol bovino a diferentes velocidades de carga orgánica



El monitoreo a la calidad del biogás a partir de la concentración de metano permite establecer la eficiencia y rendimiento del proceso. Se obtuvo una producción acumulada de metano de 197.36 NL para la VCO de 0.5 kgSV/m³_{op}*d que fue un 42.84% superior en comparación con la VCO de 1 kgSV/m³_{op}*d. Lo anterior indicó mejores rendimientos del proceso como del digestor con una VCO de 0.5 kgSV/m³_{op}*d (tabla 3). Como se observa en la figura 6, la disminución en la pendiente de la curva de producción de metano coincide con lo discutido anteriormente, relacionado a la inhibición del proceso por el contenido de AGV. La carga orgánica alimentada diariamente en la VCO de 1 kgSV/m³_{op}*d provocó una saturación de materia orgánica fácilmente biodegradable al punto de disminuir la producción y calidad de biogás (29% CH₄). Por otro lado, al reducir el contenido orgánico alimentado (VCO = 0.5 kgSV/m³_{op}*d) se obtuvieron mejores rendimientos en el proceso constantes en el tiempo de operación.

En la tabla 3 se resume del rendimiento de la CoDA ternaria, en función de la velocidad de carga orgánica (VCO de 1 y 0.5 kgSV/m³_{op}*d).

Tabla 3

Rendimiento del proceso

VCO (kgSV/m ³ _{op} *d)	Parámetro	Unidad	Relación de mezcla					
			1	2	3	4	5	6
	Relación de mezcla [SV] AM:P: EB	%	0:0:100	0:17:83	13:17:70	33:17:50	54:17:29	66:17:17
1	CH ₄	%	54.13	50.77	57.26 ± 2.85	41.31 ± 10.81	-	-
	Rendimiento del proceso	Nm ³ _{biogás} /kgSV	0.47	0.48	0.49	0.42	-	-
	Producción específica de metano	Nm ³ _{CH₄} /kgSV	0.25	0.24	0.28	0.18	-	-
0.5	CH ₄	%	-	54.20	58.80 ± 1.70	58.31 ± 1.15	58.25 ± 1.90	59.18 ± 0.85
	Rendimiento del proceso	Nm ³ _{biogás} /kgSV	-	0.92	1.12	1.14	1.08	1.05
	Producción específica de metano	Nm ³ _{CH₄} /kgSV	-	0.50	0.66	0.67	0.62	0.62

Valor promedio ± DE, n = 3.

Con relación a la producción de metano, los resultados mostraron que el contenido máximo para la VCO de 1 y 0.5 kgSV/m³_{op}*d fue del 57.26 ± 2.85 % y 59.18 ± 0.85 %, respectivamente. Este contenido alcanzado para la VCO de 0.5 kgSV/m³_{op}*d corresponde a la relación de mezcla objetivo y para la VCO de 1 kgSV/m³_{op}*d se obtuvo con la relación de mezcla de 13AM:17P:70EB. La disminución de la velocidad de carga orgánica produjo un aumento en el rendimiento del proceso. De manera similar, la producción específica de metano también aumentó con la reducción en la materia orgánica alimentada, que fue aproximadamente 2.6 veces mayor para la VCO de 0.5 kgSV/m³_{op}*d en comparación con la VCO de 1 kgSV/m³_{op}*d. Estos resultados respaldan la recomendación de Gómez Salcedo et al. (2021) de operar la CoDA de residuos

agroindustriales del café con valores bajos de VCO. En lo que refiere al rendimiento del reactor, ambos biodigestores mostraron valores similares hasta la inhibición del proceso para la VCO de 1 kgSV/m³_{op}*d en la relación de mezcla de 33AM:17P:50EB. Al trabajar con la VCO de 0.5 kgSV/m³_{op}*d, se alcanzó un rendimiento máximo de 0.57 Nm³_{biogás}/m³_{op}*d y se sostuvo en un rendimiento de 0.52 Nm³_{biogás}/m³_{op}*d para la relación de mezcla objetivo.

El rendimiento promedio alcanzado en este estudio con la VCO de 0.5 kgSV/m³_{op}*d (0.53 ± 0.04 Nm³_{biogás}/m³_{op}*d), fue aproximadamente 17 veces superior al reportado por Tafur (2023), que obtuvo una producción de biogás de 0.26 Nm³/d (58% CH₄) en la CoDA de pulpa de café y aguas mieles con estiércol bovino con una relación de mezcla en %v/v de 8AM:0.8P:25EB y 66.2% en agua, equivalente a un rendimiento de 0.03 Nm³_{biogás}/m³_{op}*d. De manera similar, Londoño (2017) obtuvo un rendimiento de biogás de 0.04 Nm³_{biogás}/m³_{op}*d (61% CH₄) para un digestor alimentado con pulpa de café y agua. Gómez Salcedo et al. (2021) obtuvieron una producción específica de metano de 0.26 ± 0.02 Nm³_{CH₄}/kgSV al trabajar con pulpa de café y estiércol bovino con una VCO de 0.2 kgSV/m³_{op}*d. Los rendimientos superiores obtenidos en este proceso comparados con otros estudios, destacan la importancia de tener en cuenta los efectos sinérgicos entre los sustratos utilizados en la CoDA.

4.2 Plan de implementación de la CoDA de residuos agroindustriales del café en un biodigestor a escala rural en una finca cafetera

4.2.1 Caso de estudio

La finca Villa Tarazona tiene un área de cultivo de 5270 m² y cuenta con alrededor de 2300 plantas de café. La temporada de cosecha abarca los meses de septiembre, octubre y noviembre. Después de la cosecha, el fruto del café en la finca es sometido al proceso de beneficio por vía húmeda. La producción anual de la finca asciende a los 625 kg de grano de café seco, generando

anualmente 675.32 kg de pulpa y 18.75 m³ de aguas mieles. Estos residuos se disponen directamente sobre praderas y cuerpos de agua sin ningún tipo de tratamiento, generando un impacto negativo en el ambiente.

La co-digestión anaeróbica de los residuos generados en la finca es una alternativa con gran potencial, respaldada por los resultados obtenidos a escala laboratorio. Además, la finca dispone del ganado necesario para asegurar disponibilidad de estiércol bovino, sustrato esencial en la CoDA. Asimismo, la producción de biogás resultante podría sustituir el consumo convencional de gas licuado de petróleo (GLP) en la finca, generalmente adquirido a través de cilindros o pipetas.

4.2.2 Estrategia de implementación de la CoDA

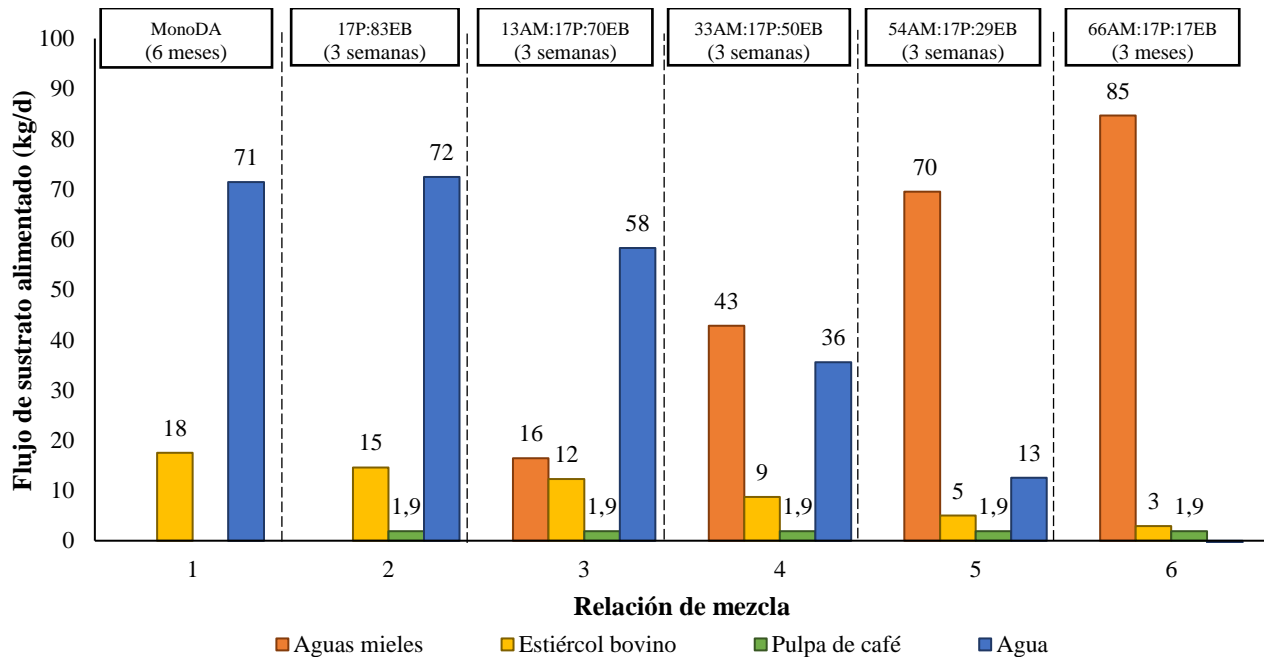
Para llevar a cabo la CoDA de aguas mieles y pulpa de café con estiércol bovino se instalará un biodigestor tubular de polietileno de baja densidad (LLDPE) en la finca Villa Tarazona. El biodigestor tendrá un volumen total de 6 m³ y un volumen de operación de 4.2 m³. El volumen del biorreactor se determinó de acuerdo al espacio disponible en la finca cafetera para su instalación. Generalmente, para un biodigestor de este tamaño, se recomienda contar con un área plana de 18 m².

Teniendo en cuenta la cantidad de residuos generados anualmente en el proceso de beneficio del café, se plantea una dieta de alimentación diaria al digestor. Sin embargo, la disponibilidad de sustrato fresco (residuos del café) es limitada durante gran parte del año. Por esto, el digestor se alimentará seis meses únicamente con estiércol bovino diluido en agua (MonoDA), con una VCO de 0.5 kgSV/m³_{op}*d (TRH = 47 días), dado que esta relación de carga orgánica fue favorable en términos de producción de metano y estabilidad del proceso a escala laboratorio en operación semicontinua. Luego de la temporada de cosecha, a partir de septiembre, se iniciará el proceso de CoDA con AM, P y EB progresivamente hasta la relación de mezcla final

(66AM:17P:17EB). En la figura 7 se plantea la agenda de alimentación para el biodigestor de la finca cafetera, con los tiempos de operación de cada relación de mezcla a lo largo del año.

Figura 7

Dieta de alimentación para el biodigestor a escala rural en la finca cafetera



Con la aplicación de la CoDA en la finca Villa Tarazona se espera gestionar el 50.80% (343.07 kg/año) de los residuos de pulpa de café y el 57.11% (10.71 m³/año) de las aguas mieles generadas en la temporada de cosecha. Además, se proyecta el tratamiento de 4398 kg/año de estiércol bovino, con un consumo de agua estimado de 17.15 m³/año. Este consumo de agua representa una reducción del 34.41%, en comparación con el requerido al trabajar únicamente con MonoDA de estiércol bovino y agua (26.14 m³/año), para el mismo biodigestor y parámetros de operación. Por lo tanto, la CoDA ternaria de residuos del café disminuye la huella hídrica del proceso, consolidándose como una alternativa sostenible para las fincas cafeteras.

4.2.3 Viabilidad económica de la implementación de la CoDA

El biogás es una fuente de energía renovable que puede sustituir el consumo de combustibles convencionales. De acuerdo con el rendimiento obtenido a escala laboratorio, se podría estimar una producción de biogás de 2.07 m³/d (745.61 m³/año), considerando la producción asociada a cada relación de mezcla, para un biodigestor de 6 m³, con un contenido de metano aproximado de 60%. Con base en las equivalencias energéticas para diferentes combustibles (Pérez-Bravo et al., 2017; Romero M., 2017), en la tabla 4 se presenta la cantidad de combustibles que el biogás obtenido de la CoDA con residuos del café puede sustituir.

Tabla 4

Equivalencia energética del biogás producido anualmente

745.61 m³/año de biogás		
Combustible	Unidad	Valor
Gas licuado de petróleo (GLP)	kg/año	320.08
Gas natural	m ³ /año	447.36
Madera	kg/año	969.29
Carbón	kg/año	521.92

El biogás producido durante un año es equivalente a 7 pipetas de GLP de 100 lb, lo que también puede traducirse en aproximadamente 4-6 horas diarias de uso de cocina (Lorenzo & Obaya, 2005) a lo largo de todo el año. Desde una perspectiva económica, esto puede tener gran impacto en las comunidades rurales que se ven obligadas a comprar los cilindros de GLP por falta de infraestructura o compleja geografía del terreno para la implementación de redes de gas natural. Además, el uso del biogás permitiría reducir la cantidad de combustibles más contaminantes como la madera (leña) y el carbón.

Con base en la producción de biogás, la aplicación de la CoDA de aguas mieles y pulpa de café con estiércol bovino puede representar un ahorro significativo para la finca Villa Tarazona. Para determinar el impacto económico, se realizó una evaluación teniendo en cuenta el análisis integral de inversiones iniciales y costos operativos recurrentes (CAPEX-OPEX). Para el estudio, se consideró como ingreso el ahorro por concepto de consumo de gas propano (GLP), principal combustible utilizado en la finca. Con relación a los costos, se tuvieron en cuenta los referentes al costo capital (CAPEX), como la adquisición del sistema de digestión (biodigestor, tuberías, reservorio de biogás, tanque de almacenamiento, estufa) y obra civil. Los costos operacionales (OPEX) considerados están relacionados al mantenimiento del sistema. En la tabla 5 se detallan los valores del CAPEX y OPEX para la implementación de la CoDA a escala rural.

Tabla 5

Ingresos y costos (CAPEX-OPEX) para la evaluación económica de la CoDA

	Concepto	Unidad	Valor
Ingresos	Ahorro del GLP	COP/kg	4,977
CAPEX	Biodigestor de 6 m ³	COP	6,130,000
	Obra civil	COP	129,999
OPEX	Mantenimiento del biodigestor	COP/año	306,500

COP = pesos colombianos

El ahorro por concepto del GLP se estimó considerando los precios por kilogramo de combustible, proporcionados por la empresa VIDAGAS (2023) para la venta de cilindros. Es importante destacar que estos precios corresponden para el municipio de Piedecuesta (Santander), donde está ubicada la finca cafetera. El precio del biodigestor de 6 m³ fue consultado directamente con una empresa proveedora de sistemas de digestión anaerobia. En el costo del sistema se incluye el servicio de instalación y accesorios necesarios para la puesta en marcha del equipo. La obra civil

corresponde a la adecuación del terreno donde estará ubicado el biodigestor y el costo se asumió como el valor de tres jornadas laborales, tomando como base el salario mínimo mensual legal vigente en Colombia para el año 2024. Por último, el mantenimiento del biodigestor (cambio de filtros, mangueras, etc.) se estimó en un valor anual igual al 5% del valor de compra del equipo, y se consideró constante durante el periodo de evaluación.

Para determinar la viabilidad económica del proyecto se consideraron los siguientes indicadores financieros: el valor presente neto (VPN), la tasa interna de retorno (TIR) y el periodo de recuperación de la inversión (PRI). Se contempló un horizonte para el proyecto de 15 años, correspondiente a la vida mínima útil del biodigestor (15-20 años) (SISTEMA.bio, 2021), y se aplicó una tasa mínima atractiva de retorno (TMAR) del 12% efectiva anual, estimada a partir del promedio de las tasas vigentes de certificados de depósito (CDT) con plazo de un año en Colombia. La proyección en el ahorro del GLP se realizó en función del índice de precios al consumidor (IPC) (Clavijo et al., 2023). Para el primer año del proyecto se tuvo en cuenta el periodo de arranque del biodigestor, que consta de un mes sin producción de biogás. El resumen de análisis económico con los principales indicadores financieros del proyecto se presenta en la tabla 6.

Tabla 6

Resumen del análisis económico para la CoDA a escala rural

Variable	Unidad	Valor
Horizonte	año	15
Tasa mínima atractiva de retorno (TMAR)	%	12
Valor presente neto (VPN)	COP	4,716,159
Tasa interna de retorno (TIR)	%	23
Periodo de recuperación de la inversión (PRI)	año	7

COP = pesos colombianos

Los indicadores financieros de la propuesta de la CoDA a escala rural proporcionan criterios de decisión para el inversionista, en este caso, el propietario de la finca cafetera. El VPN refleja el comportamiento en el presente de los flujos de caja a lo largo de la vida del proyecto. Para este análisis, se obtuvo un VPN positivo de \$ 4,716,159 COP. Por lo tanto, la inversión genera una rentabilidad superior a la TMAR, lo que implica beneficios netos al recuperar la inversión. La TIR, por su parte, es la tasa de rentabilidad generada por la inversión del proyecto y es independiente de la TMAR (Álvarez, 2017). La TIR obtenida en la implementación del proyecto fue del 23% efectiva anual, siendo mayor que la TMAR aplicada en el análisis (12%), por lo tanto, el proyecto es viable económicamente.

Otro indicador financiero que permite determinar la viabilidad económica de un proyecto, es el PRI que indica el tiempo necesario para recuperar el capital invertido. En este caso específico, el retorno de la inversión se da en el séptimo año de operación del sistema, reafirmando la factibilidad del proyecto al considerarse bajo un horizonte temporal de 15 años. En consecuencia, la implementación de la CoDA de residuos agroindustriales del café, además de ser una alternativa eficiente en la gestión sostenible de desechos agrícolas, puede representar beneficios económicos significativos vinculados a la producción de biogás.

4.2.4 Estrategia para el aprovechamiento de los residuos excedentes

El sistema de CoDA a implementar podría tratar el 50.80% (343.07 kg/año) de la pulpa de café y el 57.11% (10.71 m³/año) de las aguas mieles generadas a lo largo del año. Para una gestión integral de los residuos, es necesario implementar tecnologías alternativas de bajo costo que permitan tratar los residuos restantes y disminuir los impactos ambientales. Respecto a la pulpa de café, una de las alternativas que se han implementado es la pirólisis para convertirla en biochar. El biochar (BC) es un material rico en carbono que se produce por pirólisis de la biomasa a alta

temperatura en ausencia de oxígeno (Guo et al., 2020) y su aplicación en los suelos de la finca cafetera Villa Tarazona podría aumentar el rendimiento de los cultivos. Wang et al. (2020) reportaron que la biodisponibilidad de los nutrientes en el suelo aumenta después de la aplicación de BC debido a las interacciones entre este, la materia orgánica y la biota del suelo. Por su parte Sánchez-Reinoso et al. (2023) estudiaron la aplicación de BC de pulpa de café, y concluyeron que la aplicación de 8 y 16 toneladas por hectáreas al suelo incrementa el pH, carbón orgánico y una mayor capacidad de intercambio catiónico, lo que se traduce en una mayor fertilidad del suelo. Adicionalmente, la combinación de estas dosis de BC con fertilizantes químicos favoreció en mayor medida el pH del suelo y la respiración microbiana.

Por otra parte, las aguas mieles al ser un residuo con un pH ácido y un contenido de materia orgánica considerable, no podría verterse de manera directa sobre los cuerpos de agua ni sobre los suelos, por lo que se hace necesario ajustar el pH y disminuir la carga de contaminantes. Por otro lado, Alvarado (2014) demostró que al hacer pasar el fluido de aguas mieles por un lecho de roca caliza, el contacto del líquido ácido con la superficie de la roca caliza produce una reacción que modifica el pH logrando ajustar el pH desde un valor de 4.83 a 7.43. Asimismo, Jaulis et al. (2022) estudió el efecto de la aplicación de polímeros naturales orgánicos de carácter catiónico y aniónico en las aguas mieles. Los resultados mostraron que los polímeros naturales orgánicos pueden reducir la demanda bioquímica de oxígeno, la demanda química además los sólidos suspendidos. Estos tratamientos permitirían no solo cumplir con los requisitos ambientales para su vertido directo en cuerpos de agua o suelos, sino que también abrirían la posibilidad de considerar su uso como agua de riego, contribuyendo así a una gestión más sostenible de este residuo.

5. Conclusiones

La CoDA con residuos agroindustriales del café, pulpa (P) y aguas mieles (AM), con estiércol bovino (EB) en un biodigestor de 8.6 L bajo una VCO de $0.5 \text{ kgSV/m}^3_{\text{op}} \cdot \text{d}$ en operación semicontinua es viable para una relación de mezcla de 66AM:17P:17EB y presenta rendimientos promedio de $3 \text{ NL}_{\text{biogás}}/\text{d}$. Operar la CoDA bajo una VCO de $1 \text{ kgSV/m}^3_{\text{op}} \cdot \text{d}$ condujo a la inhibición del proceso por la elevada concentración de ácidos grasos volátiles en el biodigestor.

La implementación de un biodigestor de bajo costo en una finca cafetera permite la gestión integral del 57% de los residuos (aguas mieles y pulpa de café) generados anualmente. La limitante para abarcar el tratamiento de la totalidad de los residuos del café mediante la CoDA está relacionada con la poca disponibilidad de sustrato fresco durante gran parte del año. Además, se obtuvo una rentabilidad económica positiva reflejada en una TIR del 23% para el tiempo de vida útil del sistema digestor.

6. Recomendaciones

Con el fin de analizar el impacto de la CoDA de AM, P y EB a largo plazo y el aprovechamiento conjunto de los productos del bioproceso, se recomienda evaluar la calidad del digerido y determinar su potencial uso como biofertilizante o enmendador de suelos en la finca cafetera. Adicionalmente, se recomienda incluir los beneficios económicos derivados del uso del digerido en el estudio financiero aplicado a la finca cafetera.

Referencias bibliográficas

- Acarley, F., & Quipuzco, L. (2020). Methane production through anaerobic digestion of honey water, byproduct of coffee wet process. *Agroindustrial Science*, 10(1), 7–16. <https://doi.org/10.17268/agroind.sci.2020.01.01>
- Alvarado, M. A. (2014). USO DE ROCA CALIZA PARA EL AJUSTE DEL pH DE LAS AGUAS MIELES DEL CAFÉ. *REVISTA CIENTÍFICA*, 9(1).
- Álvarez, F. A. (2017). *TÉCNICAS PARA EVALUAR FINANCIERAMENTE PROYECTOS DE INVERSIÓN*. http://www.icesi.edu.co/departamentos/finanzas_contabilidad/
- Angelidaki, I., Boe, K., & Ellegaard, L. (2005). Effect of operating conditions and reactor configuration on efficiency of full-scale biogas plants. *Science & Technology*, 52(2), 189–194.
- Anzola, H. J., Beltrán, D. C., Facundo, E. A., De Leal, E. L., & Poveda, C. A. (1989). DIGESTIBILIDAD Y ENERGIA DIGESTIBLE DE LA PULPA DE CAFE FERMENTADA CON *Aspergillus niger* EN CERDOS. *Revista ICA*, 24.
- Arhoun, B. (2017). *DIGESTIÓN Y CODIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS AGRÍCOLAS, GANADEROS Y LODOS DE DEPURADORA* [Universidad de Málaga]. <http://orcid.org/0000-0003-2263-0639>
- Balseca, D. A., & Cabrera, J. C. (2011). *Producción de biogás a partir de aguas mieles y pulpa de café*. Zamorano.
- Bernal, J. P., & Orozco, J. P. (2019). *COMPARACION DEL ESTIÉRCOL BUFALINO Y BOVINO COMO POTENCIALES INÓCULOS EN EL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA*. Universidad Pontificia Bolivariana.

- Beyene, A., Yemane, D., Addis, T., Assayie, A. A., & Triest, L. (2014). Experimental evaluation of anaerobic digestion for coffee wastewater treatment and its biomethane recovery potential. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 11(7), 1881–1886. <https://doi.org/10.1007/s13762-013-0339-4>
- Castro, L., Escalante, H., Jaimes-Estévez, J., Díaz, L. J., Vecino, K., Rojas, G., & Mantilla, L. (2017). Low cost digester monitoring under realistic conditions: Rural use of biogas and digestate quality. *Bioresource Technology*, 239, 311–317. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.035>
- Centro de Investigaciones en Café (Cedicafé). (2018). *Buenas prácticas de beneficiado húmedo del café, fundamentales para mantener la calidad*.
- Clavijo, L., González, A., Pinzón, S., Rojas, D., Montoya, J., Miranda, A., Guáqueta, V., & Hernández, Á. (2023). *Actualización de proyecciones económicas para Colombia*.
- De la Torre, N. (2008). *DIGESTION ANAEROBIA EN COMUNIDADES RURALES*. Universidad Carlos III de Madrid.
- Esquivel, P., & Jiménez, V. M. (2012). Functional properties of coffee and coffee by-products. *Food Research International*, 46(2), 488–495. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.05.028>
- García, K. (2009). *CODIGESTIÓN ANAERÓBICA DE ESTIÉRCOL Y LODOS DE DEPURADORA PARA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS*. Universidad de Cádiz.
- Gómez Salcedo, Y., Baquerizo Crespo, R., Da Silva, A. J., Oliva Merencio, D., & Pereda Reyes, I. (2021). DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUALES SÓLIDOS DEL BENEFICIO HÚMEDO DEL CAFÉ. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 37, 281–292. <https://doi.org/10.20937/RICA.53753>

- González, L. (2015). *EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE CODIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS AGROPECUARIOS*. Universidad Veracruzana.
- González, M., Pérez, S., Wong, A., Bello, R., & Yañez, G. (2015). Residuos agroindustriales con potencial para la producción de metano mediante la digestión anaerobia. *Revista Argentina de Microbiología*, 47(3), 229–235. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2015.05.003>
- Guerrero, E. D., & Ocampo, S. (2023). *Efectos sinérgicos de la co-digestión anaeróbica de aguas mieles y pulpa de café con estiércol bovino*. Universidad Industrial de Santander.
- Guo, X., Ji, Q., Rizwan, M., Li, H., Li, D., & Chen, G. (2020). Effects of biochar and foliar application of selenium on the uptake and subcellular distribution of chromium in *Ipomoea aquatica* in chromium-polluted soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 206. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111184>
- Hill, D. T., & Bolte, J. P. (1989). Digester Stress as Related to Iso-butyric and Iso-valeric Acids*. *Biological Wastes*, 28, 33–37.
- Hill, D. T., Cobb, S. A., & Bolte, J. P. (1987). Using Volatile Fatty Acid Relationships to Predict Anaerobic Digester Failure. *American Society of Agricultural Engineers*, 30(2), 495–501.
- Houbron, E., Cano, V., Reyes, L. C., & Rustrian, E. (2007). En busca de una solución sustentable para el tratamiento de los desechos del café. *Gaceta Universidad Veracruzana*, 101.
- Jaimes-Estévez, J., Mercado, E. V., Jaramillo, J. G., Rodríguez, P., Martí-Herrero, J., Escalante, H., & Castro, L. (2022). From laboratory to farm-scale psychrophilic anaerobic co-digestion of cheese whey and cattle manure. *Bioresource Technology Reports*, 19. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101168>
- Jaulis Cancho, J. C. M., Juscamaita Morales, J. G., Villanueva Santos, E., Gutiérrez Collao, J. E., & Dilas-Jiménez, J. O. (2022). Limpieza del agua miel proveniente del beneficiado húmedo

- del café mediante polímeros naturales orgánicos. *Alpha Centauri*, 3(3), 02–10.
<https://doi.org/10.47422/ac.v3i3.84>
- Jayachandra, T., Venugopal, C., & Anu Appaiah, K. A. (2011). Utilization of phytotoxic agro waste- Coffee cherry husk through pretreatment by the ascomycetes fungi *Mycotypha* for biomethanation. *Energy for Sustainable Development*, 15(1), 104–108.
<https://doi.org/10.1016/j.esd.2011.01.001>
- Jobling, B. J., Thai, S. M., Fritz, T., Esteves, S. R., Dindale, R. M., & Guwy, A. J. (2014). An improved titration model reducing over estimation of total volatile fatty acids in anaerobic digestion of energy crop, animal slurry and food waste. *Water Research*, 61, 162–170.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.05.020>
- Londoño, H. (2017). *Aprovechamiento de pulpa de café para la producción de biogás en un reactor flujo pistón*. Universidad Pontificia Bolivariana.
- Lorenzo, Y., & Obaya, M. C. (2005). La Digestión Anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. *ICIDCA. Sobre Los Derivados de La Caña de Azúcar*, 39(1), 35–48.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120659006>
- Marin-Batista, J., Salazar, L., Castro, L., & Escalante, H. (2016). Anaerobic co-digestion of vinasse and chicken manure: alternative for Colombian agrowaste management. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 18(2), 6–12.
- Martí-Herrero, J. (2008). *Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación*. GTZ - Energía.
- Martínez-Alemán, S., Hernández-Castillo, F., Aguilar-González, C., & Rodríguez-Herrera, R. (2019). Coffee pulp extracts: A review of polyphenolic antioxidants and their antimicrobial activity. *Investigación y Ciencia*, 27(77), 73–79. <http://orcid.org/0000-0001-6697-4746>;

- Mendivelso, A. L. (2018). *Estudio de la producción de biogás mediante la co-digestión anaerobia usando como sustrato el mucílago de café y como inóculos el estiércol porcino y estiércol bovino*. Universidad Santo Tomás.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Resolución 631 de 2015. Parámetros de vertimientos*.
- Morales P., C., Rivadeneira M., B., & García M., S. (2018). Digestión anaerobia de las aguas residuales de la industria del café instantáneo. *Revista ESPAMCIENCIA*, 23–32.
- Palau, C. (2016). *Digestión anaerobia de residuos de biomasa para la producción de biogás*.
- Pérez-Bravo, S., Bautista-Vargas, M., Hernández-Sánchez, A., & Enriquez-Padilla, J. (2017). Evaluación del potencial de generación de estiércol como materia prima para la producción de biogás en la Zona Altamira, Tamaulipas. *Revista de Sistemas Experimentales*, 4(10), 34–40. www.ecorfan.org/bolivia
- Ponce, O., Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), & Red de Biodigestores para Latino América y el Caribe (RedBioLAC). (2020). *Biodigestor para tratamiento de aguas del procesamiento del café*.
- Puerta Quintero, G. I. (2000). *BENEFICIE CORRECTAMENTE SU CAFÉ Y CONSERVE LA CALIDAD DE LA BEBIDA*.
- Quintero, M., Castro, L., Ortiz, C., Guzmán, C., & Escalante, H. (2012). Enhancement of starting up anaerobic digestion of lignocellulosic substrate: Fique's bagasse as an example. *Bioresource Technology*, 108, 8–13. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.12.052>
- Quintero, S. (2016). *ESTABILIZACIÓN DE LA BIOMASA RESIDUAL DE LA PULPA DE CAFÉ MEDIANTE PROCESOS BIOQUÍMICOS: VERMICOMPOSTAJE Y DIGESTIÓN ANAEROBIA*. Universidad Industrial de Santander.

- Rodríguez, N., Zambrano, A., & Ramírez César. (2013). Manejo y disposición de los subproductos y de las aguas residuales del beneficio del café. *Manual Del Cafetero Colombiano: Investigación y Tecnología Para La Sostenibilidad de La Caficultura*, 3, 111–136. https://doi.org/10.38141/cenbook-0026_31
- Romero M., G. (2017). ¿QUÉ ES EL BIOGÁS? www.aqualimpia.de
- Salazar, L. M. (2019). *MEDICIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS Y LA REMOCIÓN DE DQO Y DBO A PARTIR DE LA DIGESTIÓN DEL MUCÍLAGO DE CAFÉ INOCULADO CON ESTIÉRCOL BOVINO EN EL MUNICIPIO DE SUAITA, SANTANDER*. Universidad Industrial de Santander.
- Salevsky, M. L. (2019). *Análisis de la viabilidad económico financiera y de la capacidad de creación de valor de un proyecto de energía eólica en Uruguay*. Universidade da Coruña.
- Sánchez-Reinoso, A., Ávila-Pedraza, E., Lombardini, L., & Restrepo-Díaz, H. (2023). The Application of Coffee Pulp Biochar Improves the Physical, Chemical, and Biological Characteristics of Soil for Coffee Cultivation. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 23, 2512–2524. <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01208-4>
- Sarabia Méndez, M. A., Laines Canepa, J. R., Sosa Olivier, J. A., & Escalante Espinosa, 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 Contaminacion Ambiental*, 33(1), 109–116. <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.01.10>
- SISTEMA.bio. (2020). *CATÁLOGO*.
- SISTEMA.bio. (2021). *MANUAL DE USUARIO*.
- Suárez, J. (2012). *Aprovechamiento de los residuos sólidos provenientes del beneficio del café, en el municipio de Betania Antioquia: Usos y aplicaciones*. Corporación Universitaria Lasallista.

- Tafur, K. Y. (2023). *ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EMPLEANDO PULPA DE CAFÉ Y AGUAS MIELES*. Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas.
- Tonanzi, B., Gallipoli, A., Gianico, A., Montecchio, D., Pagliaccia, P., Rossetti, S., & Braguglia, C. M. (2021). Elucidating the key factors in semicontinuous anaerobic digestion of urban biowaste: The crucial role of sludge addition in process stability, microbial community enrichment and methane production. *Renewable Energy*, *179*, 272–284. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.07.049>
- Torres-Valenzuela, L., Sanín-Villarreal, A., Arango-Ramírez, A., & Serna-Jiménez, J. (2019). Caracterización fisicoquímica y microbiológica de aguas mieles del beneficio del café. *Revista ION*, *32*(2), 59–66. <https://doi.org/10.18273/revion.v32n2-2019006>
- VIDAGAS. (2023). *Precios Unigas-Vidagas Noviembre*.
- Wang, D., Jiang, P., Zhang, H., & Yuan, W. (2020). Biochar production and applications in agro and forestry systems: A review. *Science of the Total Environment*, *723*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137775>
- Wijekoon, K. C., Visvanathan, C., & Abeynayaka, A. (2011). Effect of organic loading rate on VFA production, organic matter removal and microbial activity of a two-stage thermophilic anaerobic membrane bioreactor. *Bioresource Technology*, *102*(9), 5353–5360. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.12.081>
- Zambrano, D. A., & Isaza, J. D. (1994). Lavado del café en los tanques de fermentación. *Centro Nacional de Investigaciones de Café*, *45*, 106–118.