

Evaluación de la estabilidad y la eficiencia operacional de la co-digestión anaerobia de los residuos de café (pulpa y aguas mieles) con estiércol bovino en un biodigestor tubular a dos velocidades de carga orgánica

Sheyla Ginnett Gómez Cantillo y Brandon David Rodríguez Mejía

Trabajo de Grado para optar al Título de Ingeniero Químico

Modalidad trabajo de investigación

Directora

Liliana del Pilar Castro Molano

Ingeniera Química, Ph.D.

Codirectores

Humberto Escalante Hernández

Ingeniero Químico, Ph.D.

María Paula Garay Jácome

Ingeniera Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

A Dios, todo lo que soy y lo que tengo se lo debo a Él.

A mi madre, Melba, quien con su fortaleza y dedicación me convirtió en la persona que soy. Gracias mamá, por confiar en mí, por tu amor incondicional y por estar a mi lado siempre que lo necesité. Tus palabras y tu ejemplo me motivan a ser mi mejor versión. Esto es por ti.

A mi hija, Annie Sofia, mi mayor orgullo, mi fortaleza y mi fuente de inspiración. Gracias por darme fuerzas cuando sentí que no las tenía, por ser mi soporte y por no dejarme rendir. Este logro es de las dos.

A mi compañero de vida, Jhon, gracias por ser mi soporte, mi confidente y por confiar siempre en mí, No podría haberlo logrado sin el esfuerzo, apoyo y amor que das día a día para nuestra familia.

A mis hermanos, Iriana, Arley, Brandon y Zamir, quiénes siempre han creído en mí y me han dado la fuerza y el ánimo para superarme y salir adelante. Gracias por estar a mi lado en cada etapa de mi vida, por su apoyo incondicional y por compartir conmigo este camino. Son todo para mí.

A mis compañeros de carrera, y en especial a Brandon. Gracias por acompañarme en este proceso, por estar siempre para mí y por hacer más llevadero el camino. Siempre estarán en mí.

Sheyla Ginnett Gomez Cantillo.

A mi madre Yeny por su amor y apoyo incondicional durante todos estos años. A mis abuelitas Cecilia y Carmen por inculcarme los valores necesarios para ser una gran persona. A mi hermana Anyela por acompañarme siempre. A mi grupo de amigos por siempre creer en mí y en mis capacidades, a Sheyla por ser mi compañera de carrera y una gran amiga. Por último, a mí porque a pesar de las dificultades nunca dejé de intentar lograr una mejor versión. Simplemente gracias.

Brandon David Rodríguez Mejía.

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander, nuestra alma máter, por abrimos las puertas y convertimos en los profesionales que somos hoy en día.

A la Escuela de Ingeniería Química, sus profesores y sus administrativos, por brindarnos todo su conocimiento y su apoyo durante todo nuestro paso por esta gran escuela. Al grupo de investigación INTERFASE y los laboratorios de biotecnología, por permitimos aprender este gran campo y por la proporción de los recursos necesarios para llevarlo a cabo.

A los profesores Liliana Castro y Humberto Escalante, por creer en nosotros, aceptamos en el grupo de digestión anaerobia y brindamos su constante conocimiento, orientación y apoyo, gracias por las palabras de aliento en los momentos que más lo necesitábamos. A la ingeniera Paula Garay, no lo hubiéramos logrado sin ese respaldo que tuvimos, por su dedicación, su esfuerzo y su gran apoyo hacia nosotros, por ser nuestra guía durante este proceso. Al ingeniero Alexander Muñoz, por el acompañamiento y por ese gran compañerismo y carisma que lo caracteriza. A todos nuestros compañeros de laboratorio, gracias por formar parte de esta gran familia y aportar su granito de arena.

A la familia Tarazona, por abrimos las puertas de su finca, por su constante disposición para ayudarnos y por brindamos todo lo necesario, incluyendo los sustratos necesarios para nuestra investigación.

Tabla de contenido

| | Pág |
|--|------------|
| Introducción..... | 11 |
| 1. Objetivos..... | 13 |
| 1.1 Objetivo general..... | 13 |
| 1.2 Objetivos específicos | 13 |
| 2. Marco conceptual | 14 |
| 2.1 Beneficio de café | 14 |
| 2.2 Digestión Anaerobia..... | 15 |
| 2.3 Co-Digestión Anaerobia..... | 16 |
| 3. Estado del arte | 17 |
| 4. Metodología | 18 |
| 4.1 Determinación de la eficiencia de la co-digestión anaerobia de residuos de café..... | 18 |
| 4.1.1 Recolección y caracterización de los sustratos e inóculo | 18 |
| 4.1.2 Condiciones de operación y adaptación de los biodigestores a escala banco | 20 |
| 4.1.3 Monitoreo del proceso de co-digestión anaerobia..... | 23 |
| 4.2 Análisis de la estabilidad del proceso mediante indicadores de alerta temprana. | 24 |
| 4.2.1 Evaluación de la estabilidad del biodigestor | 24 |
| 4.2.2 Determinación de las concentraciones de ácidos grasos volátiles que inhiben el proceso de co-digestión de residuos de café | 25 |

| | |
|---|----|
| 5. Resultados..... | 26 |
| 5.1 Estabilidad y eficiencia operacional de la Co-digestión Anaerobia de residuos de café..... | 26 |
| 5.1.1 Caracterización de los sustratos e inóculo | 26 |
| 5.1.2 Monitoreo de la estabilidad del proceso de CoDA de residuos de café con estiércol bovino..... | 29 |
| 5.1.3 Producción de biogás..... | 32 |
| 5.1.4 Eficiencias operacionales en la CoDA de residuos de café con estiércol bovino | 35 |
| 5.2 Evaluación de la estabilidad del bioproceso | 36 |
| 5.2.1 Indicadores de alerta temprana..... | 36 |
| 5.2.2 Ácidos grasos volátiles como inhibidores del proceso de CoDA..... | 41 |
| 6. Conclusiones | 46 |
| 7. Recomendaciones..... | 46 |
| Referencias bibliográficas..... | 47 |

Lista de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Parámetros medidos para la caracterización de los sustratos y el inóculo | 19 |
| Tabla 2. Parámetros monitoreados a la entrada y salida de los biodigestores | 23 |
| Tabla 3. Límite de concentración para indicadores de alerta temprana | 25 |
| Tabla 4. Límite de concentración para distintos ácidos | 25 |
| Tabla 5. Caracterización de los sustratos | 26 |
| Tabla 6. Caracterización del inóculo | 27 |
| Tabla 7. Eficiencias operacionales del bioproceso y biodigestor para las velocidades de carga orgánica evaluadas | 35 |
| Tabla 8. Resumen de los IAT evaluados..... | 45 |

Lista de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. Etapas del proceso de beneficio húmedo del café | 15 |
| Figura 2. Etapas metodológicas..... | 18 |
| Figura 3. Ilustración del biodigestor tubular | 20 |
| Figura 4. Dieta de alimentación progresiva para cada uno de los biodigestores..... | 21 |
| Figura 5. Comportamiento de los sólidos volátiles a la entrada (afluente) y salida (efluente) de los biodigestores para las velocidades de carga orgánica evaluadas..... | 29 |
| Figura 6. Remoción de la materia orgánica en función de la DQO para las velocidades de carga orgánica evaluadas. | 31 |
| Figura 7. Producción de metano acumulada (eje principal) y su composición molar (eje secundario) durante el monitoreo para las velocidades de carga orgánica evaluadas..... | 33 |
| Figura 8. Evolución de la producción de AGV (eje principal) y la capacidad buffer (eje secundario)..... | 37 |
| Figura 9. Desviación estándar relativa durante la CoDA de la mezcla sinérgica..... | 40 |
| Figura 10. Composición de AGV (eje principal) y concentración total de AGV (eje secundario)..... | 42 |

Glosario

AGV: Ácidos grasos volátiles

AI: Alcalinidad intermedia

AP: Alcalinidad parcial

AT: Alcalinidad total

AM: Aguas mieles

BD1: Biodigestor 1

BD2: Biodigestor 2

CoDA: Co-digestión anaerobia

DA: Digestión anaerobia

DQO: Demanda química de oxígeno

DQOs: Demanda química de oxígeno soluble

DQOT: Demanda química de oxígeno total

EB: Estiércol bovino

IAT: Indicadores de alerta temprana

P: Pulpa de café

PBM: Potencial de biometanización

PVC: Policloruro de vinilo

ST: Sólidos totales

SV: Sólidos volátiles

TRH: Tiempo de retención hidráulica

VCO: Velocidad de carga orgánica

η_{bp} : Eficiencia del bioproceso

η_{bd} : Eficiencia del biodigestor

Resumen

Título: Evaluación de la estabilidad y la eficiencia operacional de la co-digestión anaerobia de los residuos de café (pulpa y aguas mieles) con estiércol bovino en un biodigestor tubular a dos velocidades de carga orgánica*

Autores: Sheyla Ginnett Gomez Cantillo, Brandon David Rodríguez Mejía**

Palabras Clave: Co-digestión anaerobia, residuos de café, velocidad de carga orgánica, biogás, ácidos grasos volátiles, indicadores de alerta temprana.

Descripción: Este estudio evaluó la estabilidad y eficiencia operacional de un sistema de Co-digestión Anaerobia (CoDA) de residuos de café (pulpa y aguas mieles) con estiércol bovino a escala banco. Se utilizaron dos biodigestores tubulares de PVC con velocidades de carga orgánica (VCO) de 0,5 y 0,75 kg SV m⁻³ op d⁻¹, implementando una etapa de acondicionamiento microbiano para estabilizar la relación de mezcla 66AM:17P:17EB %SV. La evaluación incluyó la remoción de materia orgánica, la producción de biogás y el uso de indicadores de alerta temprana de falla (IAT) para monitorear el desempeño del sistema. El biodigestor con menos VCO (BD1) alcanzó una producción de metano estable durante la adaptación y el primer tiempo de retención hidráulica (TRH), con un rendimiento de 279,162 NL CH₄, superando en un 51,45% al biodigestor con mayor carga (BD2). Sin embargo, en el segundo TRH, la acumulación de materia orgánica afectó la eficiencia del proceso, evidenciando acumulación ácidos grasos volátiles (AGV). Por su parte, en el BD2, la acumulación de materia orgánica se dio desde la etapa de adaptación, comprometiendo la estabilidad desde el inicio. Los IAT basados en titulación demostraron ser herramientas efectivas para prever fallas en el BD1, destacándose la relación alcalinidad intermedia/alcalinidad parcial (AI/AP) por su sensibilidad ante perturbaciones. En contraste, en el BD2, las fallas solo pudieron ser detectadas a través de la monitorización de los AGV individuales. Estos resultados destacan la importancia del monitoreo mediante IAT para anticipar problemas oportunamente en procesos de digestión anaeróbica.

*Trabajo de Grado

**Facultad de Ingenierías Físicoquímica. Escuela de Ingeniería Química.

Director: Liliana del Pilar Castro Molano. Ingeniera Química, PhD. Co-directores: Humberto Escalante Hernández. Ingeniero Químico, PhD. Maria Paula Garay Jácome. Ingeniera Química.

Abstract

Title: Evaluation of stability and operational efficiency in the anaerobic co-digestion of coffee residues (pulp and honey water) with cattle manure in a tubular biodigester at two organic loading rates*

Authors: Sheyla Ginnett Gomez Cantillo, Brandon David Rodríguez Mejía**

Keywords: Anaerobic co-digestion, coffee residues, organic loading rate, biogas, volatile fatty acids, early warning indicators.

Description: This study evaluated the operational stability and efficiency of a bench-scale Anaerobic Co-digestion (CoDA) system for coffee residues (pulp and molasses) with bovine manure. Two PVC tubular biodigesters were used with organic loading rates (OLR) of 0,5 and 0,75 kg SV m⁻³op d⁻¹, implementing a microbial conditioning stage to stabilize the 66AM:17P:17EB %SV mixture ratio. The evaluation included organic matter removal, biogas production, and the use of early warning indicators (EWIs) to monitor system performance. The biodigester with less OLR (BD1) achieved stable methane production during adaptation and the first hydraulic retention time (HRT), with a yield of 279,162 NL CH₄, exceeding the biodigester with higher loading (BD2) by 51,45%. However, in the second HRT, the accumulation of organic matter affected the efficiency of the process, showing the accumulation of volatile fatty acids (VFA). In BD2, on the other hand, the accumulation of organic matter occurred from the adaptation stage, compromising stability from the beginning. The titration-based IAT proved to be effective tools to predict failures in BD1, with the intermediate alkalinity/partial alkalinity (IA/PA) ratio standing out due to its sensitivity to disturbances. In contrast, in BD2, failures could only be detected through monitoring of individual VFA. These results highlight the importance of monitoring using IAT to anticipate problems in anaerobic digestion processes in a timely manner.

*Degree Work

**Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering.

Director: Liliana del Pilar Castro Molano. Chemical Engineer, PhD. Co-directors: Humberto Escalante Hernández. Chemical Engineer, PhD. Maria Paula Garay Jácome. Chemical Engineer.

Introducción

El café es una de las bebidas más consumidas a nivel global y un producto clave en la economía de Colombia, que en 2024 aportó el 10,26% al Producto Interno Bruto (PIB) agrícola del país y alcanzó una producción de 12,9 millones de sacos de 60 kilogramos (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2024) (Federación nacional de cafeteros de Colombia, 2024). Sin embargo, el beneficio húmedo, método tradicional de procesamiento del café, genera grandes cantidades de residuos, como pulpa (500 kg) y aguas mieles (10 m³) por cada tonelada de grano seco producido (Gutiérrez et al., 2020).

La pulpa y aguas mieles representan un desafío ambiental significativo debido a su alto contenido de materia orgánica, bajo pH y riesgo de contaminación de aguas superficiales y subterráneas (Hernández-Sarabia et al., 2021). La Digestión Anaerobia (DA) surge como una alternativa sostenible para valorizar los residuos del café mediante la producción de biogás. No obstante, características como el alto contenido de lignina en la pulpa (17-21,04%) y la acidez de las aguas mieles (pH <3,5-4) limitan la eficiencia del proceso de DA (Corro et al., 2013; Paredes et al., 2022; Armenta & Matiz, 2024).

Una estrategia para superar las limitaciones de la DA de pulpa y aguas mieles es la Co-digestión Anaerobia (CoDA), que implica el tratamiento simultáneo de dos o más sustratos. Este enfoque busca compensar las deficiencias individuales de cada residuo y aprovechar las sinergias de las mezclas. En este contexto, la literatura destaca el uso de estiércol bovino como cosustrato en la DA, debido a su capacidad buffer, que ayuda a mitigar la acidez, y a su aporte nutricional, que reduce los desequilibrios de nutrientes (Acosta et al., 2021). Estudios preliminares han demostrado sinergias positivas al usar mezclas específicas de los residuos del café, pero se requiere de mayor investigación en condiciones semicontinuas para evaluar la estabilidad del proceso y su viabilidad para escalamiento (Fernández Rodríguez et al., 2012).

Por ejemplo, en la CoDA de los residuos de café con estiércol bovino en operación discontinua a escala laboratorio, Guerrero & Ocampo, (2023) identificaron que una mezcla compuesta por 66% de aguas mieles, 17% de pulpa y 17% de estiércol bovino (66AM:17P:17EB %SV) presenta efectos sinérgicos positivos entre los sustratos y un potencial de biometanización (PBM) de 629 ± 9 NL CH₄ kg SV, superando significativamente a la monodigestión de estiércol bovino en relación 1:3 v/v que presenta un PBM de 328,9 NL CH₄ kg SV. Sin embargo, para el escalado de este proceso es importante realizar la operación en semicontinuo a escala laboratorio, ya que permite evaluar variables que no pueden ser analizadas en sistemas batch. Este enfoque proporciona información crucial sobre la estabilidad y viabilidad del proceso.

Un parámetro operativo importante en la estabilidad del proceso anaerobio es la Velocidad de Carga Orgánica (VCO), definida como la cantidad de materia orgánica que se carga a un biodigestor por unidad de tiempo y volumen durante el proceso de digestión. Estudios han demostrado que una VCO elevada puede incrementar la producción de AGV debido a un exceso de materia orgánica en la alimentación, lo que podría inhibir permanentemente la actividad microbiana (Grangeiro et al., 2019; Mao et al., 2015). Por lo tanto, los sustratos con un alto contenido de materia orgánica deben ser alimentados de manera controlada y gradual a un biodigestor anaerobio, con el propósito de evitar la inhibición de los microorganismos y garantizar la estabilidad del bioproceso. La literatura recomienda que los biodigestores tubulares que procesan este tipo de sustratos operen con VCO inferiores a $1 \text{ kg SV m}^{-3} \text{ op d}^{-1}$ (Jaimes-Estévez et al., 2022), lo cual permite gestionar eficazmente los residuos y obtener productos de valor, como biogás y digerido de alta calidad.

En este contexto, el objetivo de este trabajo de grado fue evaluar la estabilidad y eficiencia operacional de un sistema de Co-digestión Anaerobia de residuos de café (pulpa y aguas mieles) con estiércol bovino, utilizando un biodigestor tubular a escala banco operado con dos velocidades de carga orgánica. Este estudio busca identificar las condiciones de operación para el proceso y analizar posibles limitantes que podrían presentarse durante la implementación de esta tecnología.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Evaluar la estabilidad y eficiencia operacional del sistema de co-digestión anaerobia de los residuos de café (pulpa y aguas mieles) con estiércol bovino en un biodigestor tubular a escala banco a dos velocidades de carga orgánica.

1.2 Objetivos específicos

- Analizar la eficiencia del proceso de co-digestión anaerobia mediante el monitoreo del consumo de la materia orgánica, producción y composición de metano, en dos biodigestores tubulares, cada uno operando a velocidad de carga orgánica de $0,5 \text{ kg SV m}^{-3}\text{d}^{-1}$ y $0,75 \text{ kg SVm}^{-3}\text{d}^{-1}$, respectivamente.
- Determinar la estabilidad del proceso de co-digestión anaerobia de residuos de café (pulpa y aguas mieles) con estiércol bovino mediante el seguimiento de los indicadores de alerta temprana a partir de las velocidades de carga orgánica en estudio.

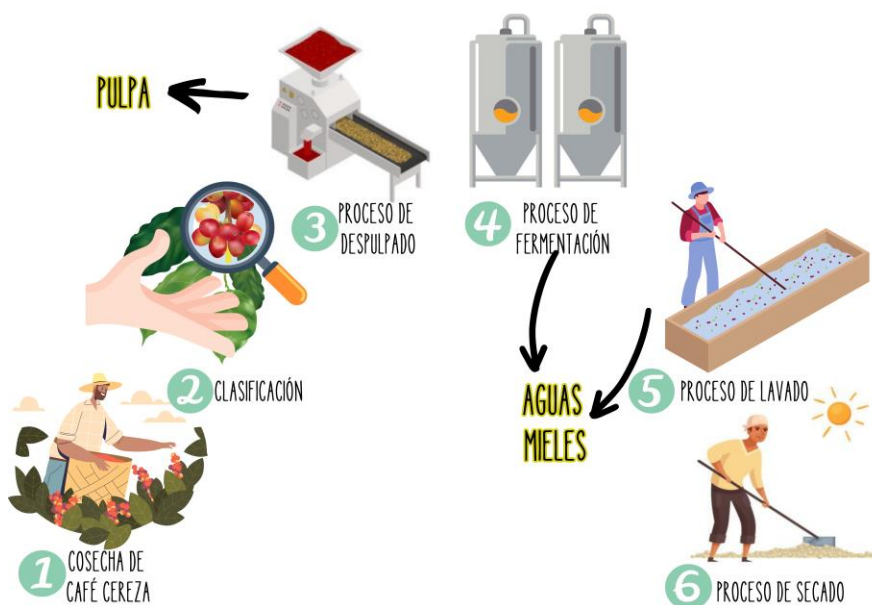
2. Marco conceptual

2.1 Beneficio de café

El proceso del beneficio de café consiste en un conjunto de operaciones para transformar los frutos de café cereza en café pergamino de alta calidad. Existen dos métodos principales de beneficio del café: el beneficio por vía húmeda y el beneficio por vía seca, siendo el método húmedo el más comúnmente utilizado por los caficultores colombianos.

El beneficio húmedo del café comienza con la *cosecha* de las cerezas maduras, seleccionando las de mejor calidad. A continuación, se realiza el *despulpado*, etapa en la que se retira la pulpa del fruto, generando un residuo sólido conocido como pulpa de café. Posteriormente, el café despulpado es clasificado según su tamaño, y se procede a la *remoción del mucílago*, una sustancia viscosa adherida al grano. Este paso tiene lugar en tanques de fermentación, donde el mucílago se degrada y es retirado mediante un lavado que consume aproximadamente 40 litros de agua por cada kilogramo de café pergamino seco producido (Rodríguez Valencia et al., 2015). En esta etapa se genera como residuo una considerable cantidad de aguas residuales, denominadas aguas mieles. Finalmente, el grano es sometido a un proceso de *secado* para reducir su contenido de humedad y, posteriormente, es *trillado* para obtener el producto final. (Rodrigo Sanz Uribe et al., 2013)

En la **Figura 1**. Se muestran las etapas del método tradicional del proceso de beneficio húmedo del café, el cual emplea agua como principal componente para la extracción de la semilla (Rattan et al., 2015). Se estima que la preparación de una taza de café (125 mL) genera aproximadamente 16 gramos de pulpa y 0,4 litros de aguas mieles como residuos. Si estos residuos no son gestionados adecuadamente, pueden ocasionar impactos ambientales significativos, afectando tanto los suelos como las fuentes hídricas. Por lo tanto, es crucial implementar tecnologías que permitan un manejo eficiente y la valorización de los residuos del café, reduciendo su impacto y promoviendo prácticas ambientales sostenibles.

Figura 1*Etapas del proceso de beneficio húmedo del café*

Nota. Adaptado de Hernández-Sarabia et al., (2021)

2.2 Digestión Anaerobia

La DA es un proceso biológico que descompone la materia orgánica en ausencia de oxígeno, convirtiéndolo en carbono orgánico en su forma más oxidada (CO_2) y más reducida (CH_4). Este proceso ocurre gracias a consorcios microbianos que actúan para producir biogás y un subproducto líquido llamado digerido, con alto contenido nutricional, útil como acondicionador de suelos (Angelidaki et al., 2011; Rivera González et al., 2012). La DA se desarrolla en cuatro etapas principales: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Adnane et al., 2024).

La **hidrólisis** es la etapa inicial, donde las moléculas complejas presentes en el sustrato, como carbohidratos, lípidos y proteínas, son descompuestas en sus respectivos monómeros (azúcares, ácidos grasos de cadena larga y aminoácidos). En la **acidogénesis**, las bacterias acidogénicas transforman estos monómeros en ácidos grasos volátiles y subproductos como CO_2 e H_2 . Durante la **acetogénesis**, los ácidos grasos volátiles se convierten en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono. Finalmente, en la

metanogénesis, arqueas metanogénicas actúan sobre los compuestos simples formados anteriormente, produciendo biogás compuesto principalmente por metano, dióxido de carbono y vapor de agua (Angelidaki et al., 2011).

Dado el alto contenido de materia orgánica en los residuos del café (pulpa y aguas mieles), la DA representa una alternativa biotecnológica viable para su gestión. Sin embargo, estos sustratos presentan limitaciones específicas: la pulpa contiene altos niveles de material lignocelulósico, lo que dificulta la disponibilidad del carbono (Gómez-Salcedo et al., 2021), mientras que las aguas mieles tienen un bajo pH y generan una elevada producción de ácidos grasos volátiles, lo que puede inhibir la actividad microbiana (Campos et al., 2021).

2.3 Co-Digestión Anaerobia

La Co-digestión Anaerobia (CoDA) permite tratar simultáneamente dos o más sustratos, mejorando significativamente el rendimiento en comparación con la digestión anaerobia de un solo sustrato (Zhang et al., 2016). La efectividad de la CoDA depende en gran medida de las características que aporta cada co-sustrato. Por ejemplo, el estiércol bovino es un co-sustrato comúnmente utilizado, puesto que mitiga la acidez debido a su alta capacidad buffer, además de aportar nitrógeno y una amplia gama de nutrientes esenciales (Moral et al., 2008; Pinto et al., 2023).

El éxito de la CoDA requiere el control de variables críticas para evitar la desestabilización del proceso, debido a que los microorganismos son sensibles a cambios en su entorno (Álvarez et al., 2010). Entre las variables más importantes se encuentran la velocidad de carga orgánica (VCO) y el tiempo de retención hidráulico (TRH). Un mayor TRH (o menor VCO) suele mejorar la eficiencia del bioproceso, ya que proporciona tiempo suficiente para una degradación completa de los sustratos (Mao et al., 2015). Además, es

crucial establecer proporciones apropiadas entre los sustratos para garantizar un balance adecuado de proteínas, lípidos y carbohidratos, minimizar efectos inhibitorios y potenciar el sinergismo microbiano (Chen et al., 2008).

3. Estado del arte

Algunos estudios han explorado la viabilidad de la DA de los residuos de café, aunque pocos se han centrado en el tratamiento conjunto de la pulpa y aguas mieles de café. Corro et al., (2013) realizaron una comparación entre la DA de pulpa de café y su co-digestión con estiércol bovino, utilizando reactores batch de 15 L operados a temperatura ambiente. La DA de la pulpa presentó una baja conversión de materia orgánica (<15% SV). Mientras que, la CoDA con estiércol bovino favoreció una rápida degradación de la materia orgánica, presentando un incremento del 63% en la producción de biogás.

Por otra parte, Gómez-Salcedo et al., (2021) analizaron el efecto del incremento de la carga orgánica durante la DA de la pulpa de café. Emplearon un reactor de vidrio de doble pared con agitación magnética de 1 L de capacidad y estiércol bovino estabilizado como inóculo, en operación semicontinua. Recomendaron no operar biodigestores con cargas superiores a $0,5 \text{ g SV L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ al tratar residuos de café, debido a que resultaba en inestabilidad del sistema, reflejada en disminución del rendimiento de metano. Esto se atribuyó a la acumulación de compuestos tóxicos como cafeína, ácido cafeico, fenoles libres y polifenoles, presentes en la pulpa de café.

Guerrero & Ocampo, (2023) investigaron la CoDA de aguas mieles y pulpa de café con estiércol bovino, usando reactores batch de 110 ml a $37 \text{ }^\circ\text{C}$ y empleando estiércol bovino estabilizado como inóculo. Determinaron que la proporción de mezcla óptima era de 66% aguas mieles, 17% pulpa y 17% estiércol bovino (%SV). Esta composición presentó una sinergia positiva entre los sustratos y alcanzó un potencial de biometanización de $629 \text{ NL CH}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ SV}$. Posteriormente, Armenta & Matiz, (2023) estudiaron la viabilidad de esta mezcla en operación semicontinua a temperatura ambiente. Sus resultados mostraron que una carga de $0,5 \text{ kg SV m}^{-3} \text{ op d}^{-1}$ logró una producción acumulada de metano de 197,36 NL, representando un incremento del

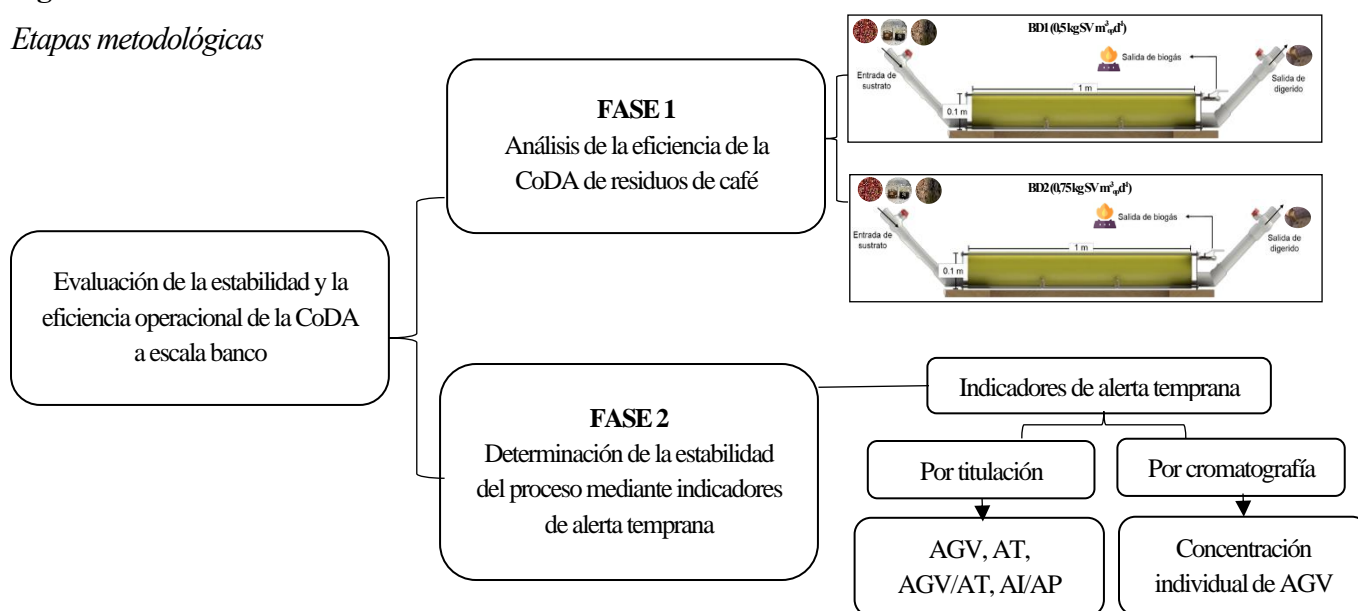
42,84% en comparación con una carga de $1 \text{ kg SV m}^{-3} \text{ op d}^{-1}$. Concluyeron que una alta carga orgánica induce la inhibición del proceso por acumulación excesiva de AGV (superior a $4760 \text{ mgCH}_3\text{COOH/L}$ en el efluente).

4. Metodología

La metodología experimental para evaluar la CoDA de pulpa y aguas mieles de café con estiércol bovino se desarrolló en un biodigestor tubular operado de manera semicontinua, evaluando dos velocidades de carga orgánica. Se utilizó un enfoque metodológico, como se ilustra en la **Figura 2**.

Figura 2

Etapas metodológicas



4.1 Determinación de la eficiencia de la co-digestión anaerobia de residuos de café

4.1.1 Recolección y caracterización de los sustratos e inóculo

Tanto los sustratos como el inóculo fueron recolectados en la finca cafetera Villa Tarazona, ubicada en Piedecuesta, Santander (latitud $6^{\circ}57'20''\text{N}$; longitud $72^{\circ}59'14''\text{O}$). Esta finca cuenta con un área de cultivo de 5270 m^2 , equivalente a 2300 plantas de café, en donde se producen anualmente 652 kg de grano seco. Como subproductos, se generan 657 kg de pulpa y 19 m^3 de aguas mieles. El inóculo utilizado correspondió a un lodo

anaerobio proveniente de un biodigestor tubular de bajo costo, con volumen total de 6 m³, operado durante un año en la misma finca. Este biodigestor es alimentado diariamente con estiércol bovino y agua en una proporción de 1:3 (v/v).

Con el propósito de determinar la viabilidad de los residuos como sustratos en el proceso de DA, se realizó una caracterización fisicoquímica de los mismos para conocer sus propiedades y calcular los flujos máxicos en la dieta de alimentación del biodigestor. Asimismo, el inóculo fue caracterizado bioquímicamente para conocer su calidad como medio de inoculación de los biodigestores. En la caracterización de los sustratos y el inóculo se incluyeron los análisis descritos en la **Tabla 1**.

Tabla 1

Parámetros medidos para la caracterización de los sustratos y el inóculo

| Parámetro | Unidad | Método de medición | Fuente |
|-----------------------------|---------------------------------------|----------------------------|---------------------------------------|
| Sólidos totales y volátiles | g kg ⁻¹ | Gravimétrico (SM 2540-E) | APHA, 2005 |
| Demanda química de oxígeno | mgDQO/L | Colorimétrico (SM 5220-D) | APHA, 2005 |
| Ácidos grasos volátiles | mgCH ₃ COOHL ⁻¹ | Titulación y cromatografía | M. Søndergaard et al., 2015 |
| Alcalinidad total | mgCaCO ₃ L ⁻¹ | Titulación | Yenigün & Demirel, 2013 |
| pH | - | Potenciométrico (NTC 4888) | APHA, 2005 |
| Actividad metanogénica* | gDQOg ⁻¹ SVd ⁻¹ | Manométrico | Yap et al., 2018; Astals et al., 2015 |
| Actividad hidrolítica* | gDQOg ⁻¹ SVd ⁻¹ | Manométrico | Yap et al., 2018; Astals et al., 2015 |

*Parámetros medidos sólo para el inóculo

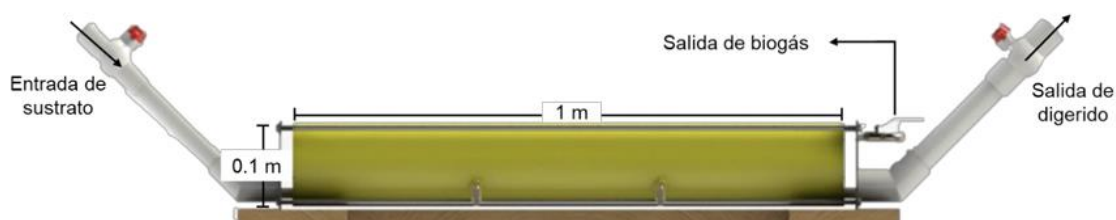
Adicionalmente, la composición elemental, contenido de nutrientes, lípidos, carbohidratos y azúcares de la pulpa y las aguas mieles de café se determinó mediante análisis de cromatografía líquida - RIS GOMEAZ.01, según los métodos empleados por el Centro de diagnóstico: Laboratorio Calderón.

4.1.2 Condiciones de operación y adaptación de los biodigestores a escala banco

El estudio de la CoDA se llevó a cabo evaluando la eficiencia y estabilidad del proceso en dos biodigestores tubulares fabricados con policloruro de vinilo (PVC). Cada biodigestor tenía un volumen total de 8 L. Su capacidad de operación fue del 70%, lo que correspondió a un volumen operacional de 5,6 L.

Figura 3

Ilustración del biodigestor tubular



- *Velocidades de carga orgánica y tiempos de retención hidráulico:*

Los biodigestores operaron con velocidades de carga orgánica (VCO) de 0,5 y 0,75 kg SV m⁻³ op d⁻¹, considerando exclusivamente la fase líquida correspondiente al volumen operacional de 5,6 L.

En función de estas VCO, se calcularon los tiempos de retención hidráulica (TRH) utilizando la Ec. 1.

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

En donde,

TRH= Tiempo de retención hidráulico (d)

ρ_{alimento} = Densidad del alimento (kg m⁻³)

VCO= Velocidad de Carga Orgánica (kg SV m⁻³ op d⁻¹)

f_k = Fracción del sustrato en el alimento

SV= Sólidos volátiles de sustrato (g SV kg^{-1})

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

Este cálculo permitió evaluar la relación entre el volumen de operación del biodigestor y la velocidad con que se alimentaron los sustratos, obteniendo TRH de 44 y 29 días para las VCO de 0,5 y 0,75 $\text{kg SV m}^3 \text{ d}^{-1}$, respectivamente.

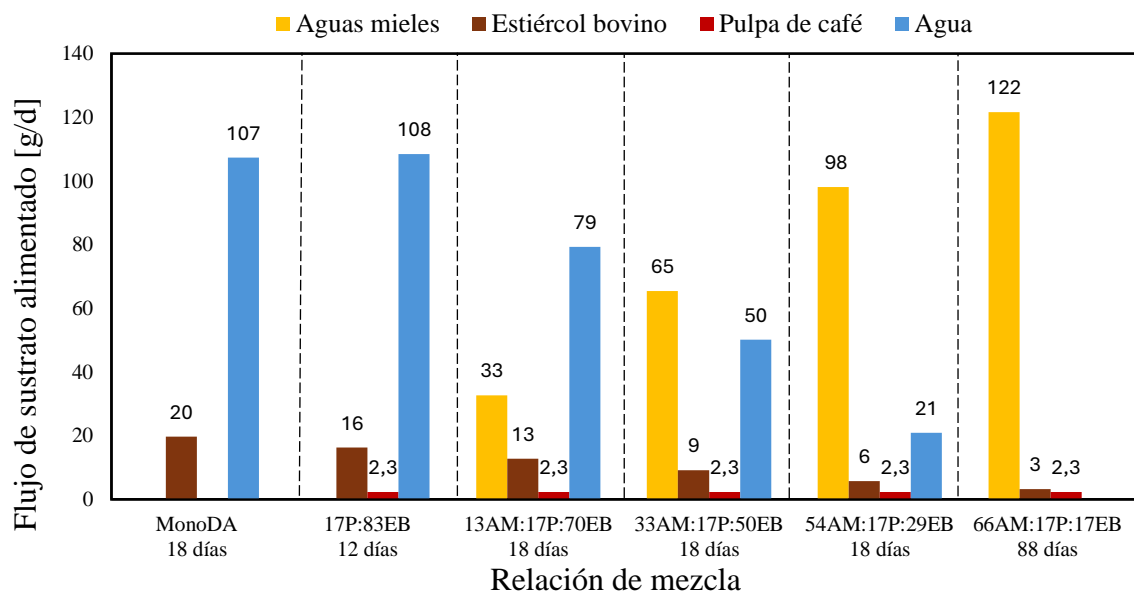
- *Proceso de arranque y adaptación del consorcio microbiano:*

El arranque de los biodigestores comenzó después de realizar la caracterización de los sustratos y definir las condiciones de operación. Para ello, se implementó una etapa de acondicionamiento microbiano con el objetivo de favorecer la adaptación del consorcio de microorganismos a los nuevos sustratos, pulpa y aguas mieles de café. En la fase inicial del proceso de adaptación, los biodigestores fueron inoculados con lodo anaeróbico estabilizado de estiércol bovino y alimentados con una mezcla de estiércol bovino fresco y agua en una proporción de 1:3 (v/v), estrategia recomendada en la literatura para potenciar la actividad microbiana y alcanzar un potencial adecuado de producción de metano (Martí-Herrero, 2019). Posteriormente, se introdujo la pulpa de café como co-sustrato (CoDA binaria), debido a que, por su alto contenido de lignocelulosa, presenta una baja biodegradabilidad anaerobia, lo que requiere un mayor tiempo de retención en el biodigestor para su tratamiento. Finalmente, se fue reduciendo gradualmente el consumo de agua mientras se incorporaron las aguas mieles de café, hasta alcanzar la relación de mezcla sinérgica propuesta previamente en los estudios realizados en el Laboratorio de Digestión Anaerobia del grupo de investigación INTERFASE (Guerrero & Ocampo, 2023). La **Figura 4** muestra las etapas implementadas para incorporación de los sustratos en el alimento y sus respectivas proporciones durante el periodo de adaptación.

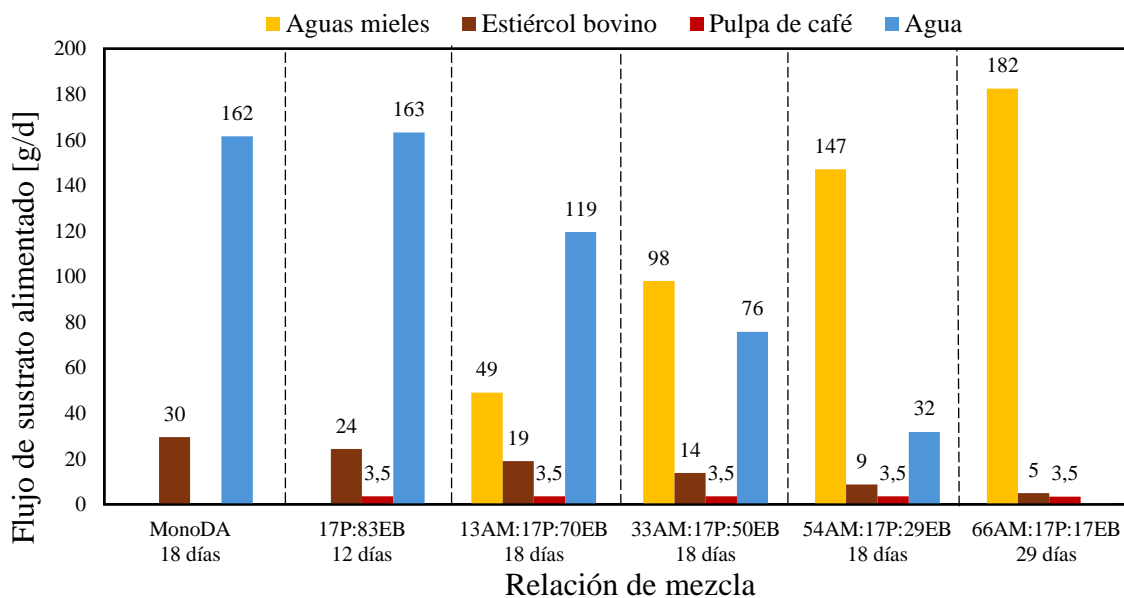
Figura 4

Dieta de alimentación progresiva para cada uno de los biodigestores. 4a. VCO de $0,5 \text{ kg SV m}^{-3} \text{ op d}^{-1}$ y 4b. VCO de $0,75 \text{ kg SV m}^{-3} \text{ op d}^{-1}$

a) VCO de $0,5 \text{ kg SV m}^{-3} \text{ op d}^{-1}$



b) VCO de $0,75 \text{ kg SV m}^{-3} \text{ op d}^{-1}$



Se llevó a cabo la estrategia de alimentación recomendada por el grupo de investigación. Cada mezcla del período de adaptación se alimentó durante 18 días, a excepción de la CoDA binaria con pulpa de café (17P:83EB). Este sustrato se incorporó primero al sistema, durante 12 días.

4.1.3 Monitoreo del proceso de co-digestión anaerobia

El proceso fue monitoreado durante dos etapas: el periodo de adaptación y la etapa de CoDA con la mezcla sinérgica (66AM:17P:17EB %SV). El monitoreo se le realizó al alimento y al digerido, e incluyó los análisis descritos en la **Tabla 2**.

Tabla 2

Parámetros monitoreados a la entrada y salida de los biodigestores

| Parámetro | Unidad | Método de medición | Referencia |
|-----------------------------|--------------------|---------------------------|-------------------------|
| Sólidos totales y volátiles | g kg ⁻¹ | Gravimétrico (SM 2540-E) | APHA, 2005 |
| Demanda química de oxígeno | mgDQO/L | Colorimétrico (SM 5220-D) | APHA, 2005 |
| Composición de metano | %mol | Cromatografía (SRI 8610C) | - |
| Volumen de metano | L | Manométrico | Angelidaki et al., 2011 |

Para evaluar la eficiencia del proceso de CoDA, se realizó un balance de masa tomando como base la demanda química de oxígeno (DQO) y teniendo en cuenta la acumulación de sólidos sedimentados dentro del biodigestor según la ecuación 2. Dado que el proceso anaerobio ocurre en ausencia de oxígeno, la DQO se conserva a lo largo del proceso. Esto significa que la DQO del sustrato inicial equivale a la suma de la DQO del efluente, metano y la materia orgánica que se acumula en el biodigestor (Feliu Jofre & Flotats Ripoll, 2019).

$$DQO_{T_{Afluente}} = DQO_{T_{Efluente}} + DQO_{T_{CH_4}} + DQO_{T_{Biodigestor}} \quad (\text{Ec.2})$$

La demanda química de oxígeno total correspondiente al metano ($DQO_{T_{CH_4}}$) se determinó empleando la relación teórica de que 0,35 L CH₄ equivalen a 1 g DQO_{T_{CH₄} en condiciones estándar (25 °C y 1 atm).}

Con base a esta relación, se calcularon las variables de la ecuación 2, y la remoción de la materia orgánica fue estimada mediante la ecuación 3, teniendo en cuenta que los valores de la DQO del afluente se estimaron mediante una media móvil, considerando valores de hasta un TRH previo a la medición.

$$\%Rem = \frac{(DQO_{Afluente} - DQO_{Efluente} - DQO_{Biodigestor})}{DQO_{Afluente}} \quad (Ec. 3)$$

Además, se midió el volumen diario de metano para calcular las eficiencias operacionales de acuerdo con las ecuaciones propuestas por Martí-Herrero et al., (2015). La eficiencia del bioproceso (η_{bp}) relaciona el volumen de metano producido diariamente con la materia orgánica alimentada al biodigestor. Mientras que, la eficiencia del biodigestor (η_{bd}) relaciona el volumen de biogás producido con el volumen del biodigestor.

$$\eta_{bp} = \frac{m^3 CH_4}{kgSV_{in} * día} \quad (Ec. 4)$$

$$\eta_{bd} = \frac{m^3 biogás}{m^3 dig * día} \quad (Ec. 5)$$

Estos parámetros permitieron evaluar el desempeño del sistema de co-digestión y su capacidad para degradar los residuos para las condiciones operacionales definidas.

4.2 Análisis de la estabilidad del proceso mediante indicadores de alerta temprana.

4.2.1 Evaluación de la estabilidad del biodigestor

Durante el proceso de CoDA se monitoreó el desempeño del sistema empleando indicadores de alerta temprana de falla (IAT) para identificar fallas en el bioproceso. Los IAT son parámetros fisicoquímicos relacionados con los productos intermedios o finales de la DA y resultan esenciales para detectar de manera efectiva cualquier inestabilidad del proceso (Di et al., 2019).

Los parámetros utilizados como IAT fueron la concentración de ácidos grasos volátiles (AGV), alcalinidad total (AT), alcalinidad parcial (AP), alcalinidad intermedia (AI), las relaciones AGV/AT y AI/AP, así como el contenido de CH₄. El monitoreo continuo se enfocó en verificar que los valores de estos indicadores no superaran los límites críticos establecidos en la **Tabla 3**.

Tabla 3

Límite de concentración para indicadores de alerta temprana

| Indicador | Unidad | Límite de concentración | Método de medición | Referencia |
|---|---|-------------------------|----------------------------|--|
| Ácidos grasos volátiles | mgCH ₃ COOH L ⁻¹ | 1500 | Titulación y cromatografía | M. Søndergaard et al., 2015 |
| Alcalinidad total | mgCaCO ₃ L ⁻¹ | 6500 | Titulación | Yenigün & Demirel, 2013 |
| Relación AGV/AT | mgCH ₃ COOH mgCaCO ₃ ⁻¹ | 0,8 | Titulación | Callaghan et al., 2002 |
| Relación AI/AP | - | 0,9-1,44 | Titulación | Ferrer et al., 2010; Pereira et al., 2009 |
| Relación CH ₄ /CO ₂ | - | 0,2-0,9 | Cromatografía (SRI 8610C) | Li et al., 2017, 2018 |

Aunque la literatura establece valores límite para la estabilidad de sistemas de DA, estos pueden variar según las características específicas del sustrato y las condiciones operacionales. Adicionalmente, se consideró como señal de alerta cualquier variación estándar relativa (RSD) superior al 20% en comparación con la semana anterior, lo cual indicaría una posible falla en el funcionamiento del biodigestor. (Miramontes et al., 2023)

4.2.2 Determinación de las concentraciones de ácidos grasos volátiles que inhiben el proceso de co-digestión de residuos de café

Durante el monitoreo del proceso de co-digestión de pulpa y aguas mieles de café con estiércol bovino, se analizaron las concentraciones de AGV de cadena corta (entre 2 y 6 carbonos) mediante cromatografía de gases. Este análisis es crucial debido a la influencia directa que los AGV tienen sobre la estabilidad del bioproceso. En la literatura, se han identificado concentraciones límite para ciertos ácidos, ya que su acumulación

puede generar desequilibrio en las rutas metabólicas del sistema, particularmente en las etapas productoras y consumidoras de ácidos. Los rangos de concentración límite se presentan en la **Tabla 4**.

Tabla 4

Límite de concentración para distintos ácidos

| Indicador | Unidad | Digestor saludable | Fuente |
|-------------------|---------|--------------------|---------------------------------------|
| Ácido acético | mgDQO/L | < 853,33 | (Hill et al., 1987) |
| Ácido isobutírico | mgDQO/L | < 27,27 | (Hill & Bolte, 1989) |
| Ácido butírico | mgDQO/L | < 18,18 | (Li et al., 2017) |
| Ácido isovalérico | mgDQO/L | < 20,39 | (Hill & Bolte, 1989; Li et al., 2017) |
| Ácido propiónico | mgDQO/L | < 121,08 | (Li et al., 2017) |
| Relación P/A | - | < 1,4 | (Hill & Bolte, 1989) |

5. Resultados

5.1 Estabilidad y eficiencia operacional de la Co-digestión Anaerobia de residuos de café

5.1.1 Caracterización de los sustratos e inóculo

En la **Tabla 5** y **Tabla 6** se presenta los resultados de la caracterización fisicoquímica de los sustratos y del inóculo, respectivamente.

Tabla 5

Caracterización de los sustratos

| Parámetro | Unidad | Pulpa de café | Aguas mieles | Estiércol bovino |
|------------------------------------|-----------------------|---------------|--------------|------------------|
| Sólidos Totales | g kg ⁻¹ | 182,343±7,32 | 17,749±0,03 | 167,748±70,44 |
| Sólidos Volátiles | g kg ⁻¹ | 167,410±7,57 | 16,172±0,03 | 136,713±57,99 |
| pH | - | 3,74 | 4,2 | 8,22 |
| Demanda química de Oxígeno Total | g DQO L ⁻¹ | 70,64±0,52 | 24,83±14,8 | 33,67±14,14 |
| Demanda química de Oxígeno soluble | g DQO L ⁻¹ | - | 6,61±0,46 | 1,82±0,01 |

| | | | | |
|-------------------------|--|---|---|-------------|
| Ácidos grasos volátiles | g CH ₃ COOH L ⁻¹ | - | 1,38±0.08 | 0,464±0.015 |
| Alcalinidad total | g CaCO ₃ L ⁻¹ | | 0,49±0.005 | 0,54±0.016 |
| Extracto Etéreo | % BS* | 0,58 | 2,92 | - |
| Cenizas | % BS* | 13,88 | 8,98 | - |
| Proteína cruda | % BS* | 9 | 18,44 | - |
| Lignina | % BS* | 29,54 | 32,32 | - |
| Celulosa | % BS* | 16,28 | 11,15 | - |
| Hemicelulosa | %BS* | 0 | 0 | - |
| Humedad | %BH** | 84,05 | 92,18 | - |
| Fósforo | % BS* | 0,19 | 0,20 | - |
| Azufre | %BS* | 0,24 | 0,32 | - |
| Formula empírica | - | C ₃₈ H _{58,3} O _{24,9} N | C _{19,8} H _{28,5} O _{11,9} N | - |
| Relación C/N | % | 32,75 | 16,81 | - |

*BS: Base seca; **BH: Base húmeda

Tabla 6

Caracterización del inóculo

| Parámetro | Unidad | Inóculo |
|------------------------------------|---------------------------------------|---------------|
| Sólidos Totales | g kg ⁻¹ | 22,97±0,67 |
| Sólidos Volátiles | g kg ⁻¹ | 16,03±0,49 |
| Demanda química de Oxígeno Total | gDQOL ⁻¹ | 28,33±1,41 |
| Demanda química de Oxígeno soluble | gDQOL ⁻¹ | 1,64±0,07 |
| Actividad metanogénica | gDQOg ⁻¹ SVd ⁻¹ | 0,0455±0,0025 |
| Actividad hidrolítica | gDQOg ⁻¹ SVd ⁻¹ | 0,0653±0,0016 |

De acuerdo con los resultados mostrados en la **Tabla 5**, las aguas mieles (AM) presentan un contenido de materia orgánica del 91% (SV/ST) y un alto nivel de carbohidratos, constituidos principalmente por azúcares reductores. Debido a su estructura química simple, estos azúcares convierten las AM en un sustrato altamente susceptible a una rápida degradación y fermentación (Campos et al., 2021). Sin embargo, las AM presentan limitaciones significativas debido a su alto contenido de AGV y una relación C/N de 16,81, que está por debajo

del rango recomendado en la literatura (25-35) para garantizar un equilibrio adecuado de nutrientes en los procesos de DA (Ruihong & Zhiqin, 1999).

Por su parte, la pulpa de café (P) también contiene un alto porcentaje materia orgánica (92%) y una relación C/N favorable (32,75), lo que la hace adecuada como sustrato en procesos de DA. No obstante, su naturaleza lignocelulósica presenta un desafío. La estructura tridimensional de la lignocelulosa dificulta la hidrólisis enzimática, su contenido de celulosa (16,28%) es relativamente más susceptible a la degradación, ya que sigue una cinética de primer orden que, aunque lenta, es factible (Guerrero & Ocampo, 2023; Manyi-Loh & Lues, 2023). Por otro lado, la lignina (29,54%), con su estructura compleja y recalcitrante, presenta una alta resistencia a la degradación química y biológica, limitando su disponibilidad para la DA (Martínez et al., 2005).

Respeto al pH, ambos sustratos tienen un pH ácido (3,74 en la pulpa y 4,2 en las aguas mieles), lo que puede afectar la estabilidad del proceso. En este contexto, el estiércol bovino actúa como un cosustrato que contribuye al equilibrio del sistema, gracias a su pH alcalino (8,22), lo cual ayuda a neutralizar la acidez de las aguas mieles y la pulpa, aportando estabilidad al proceso (Hoyos et al., 2024).

El rendimiento en la producción de biogás está estrechamente relacionado con las características del inóculo utilizado en el proceso de DA, especialmente en términos de sus actividades hidrolítica (AH) y metanogénica (AME). La AH mide la capacidad de las bacterias para descomponer compuestos orgánicos complejos en sus monómeros básicos, facilitando su posterior transformación en productos más simples (Quintero et al., 2012). La AME, por otro lado, refleja la habilidad de las comunidades microbianas para convertir los AGV y el acetato en metano, etapa crítica para la generación de biogás (Jaimes-Estévez et al., 2022).

En la **Tabla 6** se reportan valores de AH y AME de 0,0653 y 0,0455 g DQO g⁻¹ SV d⁻¹ respectivamente. Estos resultados son comparables a los obtenidos por Jaimes Estévez (2024), quien reportó valores de 0,10 y 0,054 g DQO g⁻¹ SV d⁻¹ para AH y AME, respectivamente, utilizando un inóculo bajo condiciones similares.

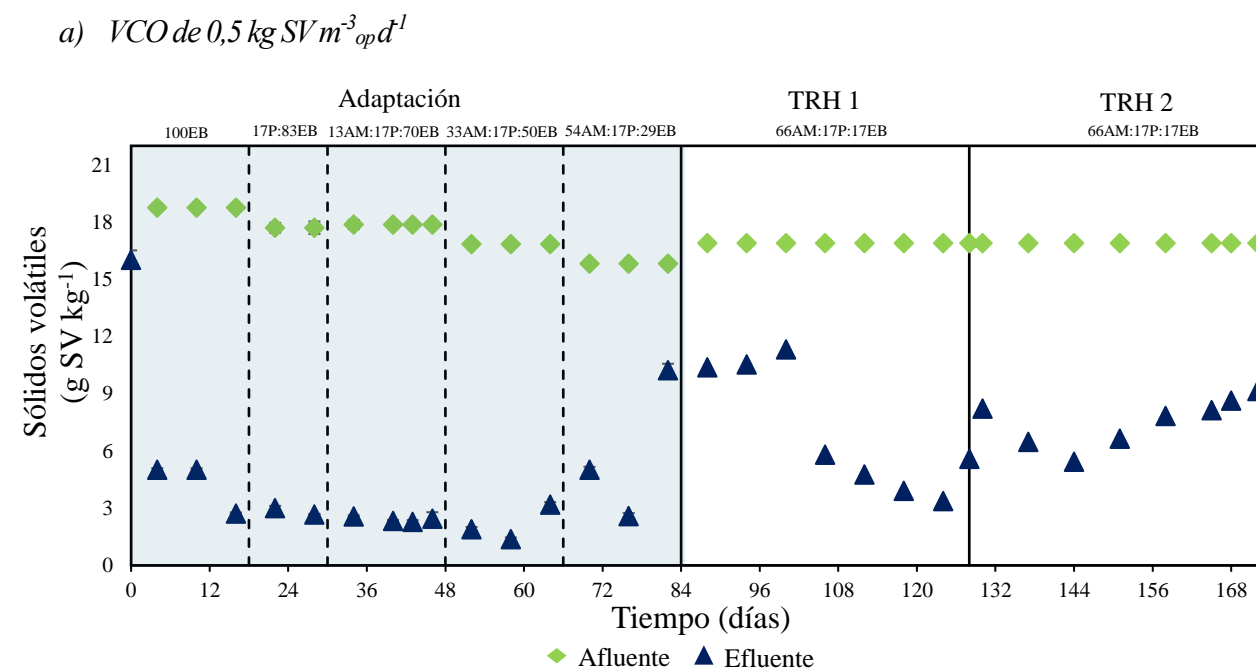
Esto sugiere que las capacidades microbianas del inóculo empleado son adecuadas para la degradación de sustratos complejos, como los residuos lignocelulósicos (Quintero et al., 2012).

5.1.2 Monitoreo de la estabilidad del proceso de CoDA de residuos de café con estiércol bovino

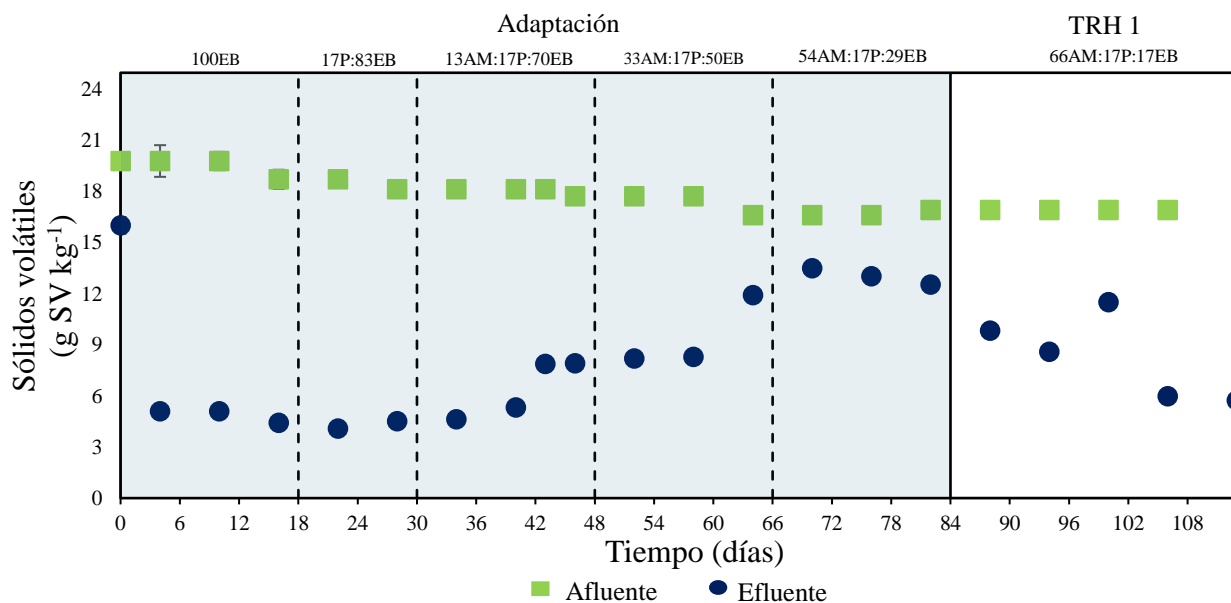
La estabilidad del proceso de CoDA en alimentación semicontinua puede evaluarse considerando tanto la remoción de materia orgánica como la producción de biogás, en función del tiempo de operación. Dado el alto contenido de materia orgánica presente en los residuos de café (pulpa y aguas mieles) y el estiércol bovino, estos sustratos ofrecen un potencial significativo para la biodegradación. En este contexto, la **Figura 5** presenta el comportamiento de los sólidos volátiles (SV) en el afluente y el efluente de los biodigestores operados a las velocidades de carga orgánica evaluadas.

Figura 5

Comportamiento de los sólidos volátiles a la entrada (afluente) y salida (efluente) de los biodigestores para las velocidades de carga orgánica evaluada. 5a. VCO de $0,5 \text{ kg SV m}^{-3} \text{ op d}^{-1}$ y 5b. VCO de $0,75 \text{ kg SV m}^{-3} \text{ op d}^{-1}$



b) VCO de $0,75 \text{ kg SV m}^{-3} \text{ op d}^{-1}$



Durante el monitoreo, en el BD1 (VCO de $0,5 \text{ kg SV m}^{-3} \text{ op d}^{-1}$), se observó una reducción de sólidos volátiles (SV) del 75% en el periodo de adaptación. Sin embargo, esta eficiencia disminuyó progresivamente en la mezcla sinérgica, registrando un 56% en el primer tiempo de retención hidráulica (TRH) y un 47% en el segundo TRH. Por su parte, en el BD2 (VCO de $0,75 \text{ kg SV m}^{-3} \text{ op d}^{-1}$), la reducción de SV fue del 56% en el periodo de adaptación y del 51% durante el primer TRH con la misma mezcla.

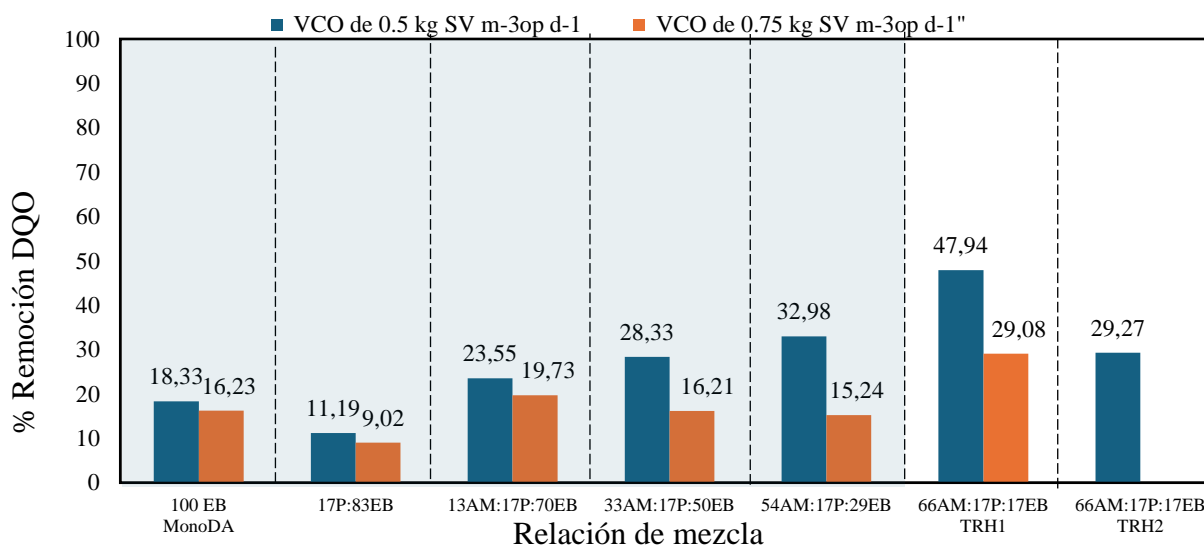
Este comportamiento en la reducción de SV podría atribuirse a la sobresaturación del sistema de digestión, ocasionada por el alto contenido de material lignocelulósico aportado por la pulpa de café, que presenta una baja biodegradabilidad anaerobia. Al introducir la mezcla sinérgica en el proceso, los microorganismos metabolizaron rápidamente las fracciones fácilmente biodegradables de la mezcla, como los azúcares. Sin embargo, a medida que estas fracciones se agotaron, compuestos más recalcitrantes, como la lignina presente en la pulpa de café, comenzaron a predominar, impactando negativamente el proceso debido a hidrólisis lenta (Battista et al., 2016; Martí Herrero, 2019). Este cambio limitó la actividad microbiana, lo que derivó en la acumulación de materia orgánica dentro del biodigestor, afectando la estabilidad del proceso. Esto

infiere que, en procesos de DA, la acumulación de compuestos lignocelulósicos se intensifica bajo altas velocidades de carga orgánica.

Para determinar la cantidad de materia orgánica efectivamente degradada, se empleó un balance de masa en términos de la demanda química de oxígeno (DQO). En la **Figura 6** muestra el comportamiento de la remoción de materia orgánica en términos de DQO para cada una de las mezclas estudiadas en ambas cargas orgánicas.

Figura 6

Remoción de la materia orgánica en función de la DQO para las velocidades de carga orgánica evaluadas.



De acuerdo con Angelidaki et al., (2011), un proceso de DA eficiente debe alcanzar al menos un 30% de remoción de materia orgánica. En la **Figura 6** se observa que la remoción de DQO varía en función de la VCO y la relación de mezcla utilizada para alimentar los biodigestores estudiados. Los resultados indican que el biodigestor operado con una VCO de 0,5 kg SV m⁻³ op d⁻¹ (BD1) alcanzó mejores tasas de remoción en comparación con el operado a 0,75 kg SV m⁻³ op d⁻¹ (BD2), lo que sugiere que la menor carga orgánica favoreció la estabilidad del proceso y la degradación de los sustratos.

En el BD1, la remoción de DQO aumentó progresivamente con la incorporación de aguas mieles al proceso, alcanzando un 47,94% durante el primer TRH con la mezcla sinérgica (66AM:17P:17EB). Sin embargo, en el segundo TRH, la remoción disminuyó a 29,27%, lo que podría atribuirse a la acumulación de compuestos inhibitorios, como AGV y fenoles libres, que son comunes en los residuos de café (Corro et al., 2013; Fan et al., 2006; Selvankumar et al., 2017; Widjaja et al., 2017). En contraste, el BD2 mostró remociones inferiores a lo largo de la experimentación, con valores máximos de 29,08%, lo que sugiere que la mayor VCO exacerbó los problemas de estabilidad debido a la sobresaturación de materia orgánica y un TRH insuficiente para la adaptación microbiana.

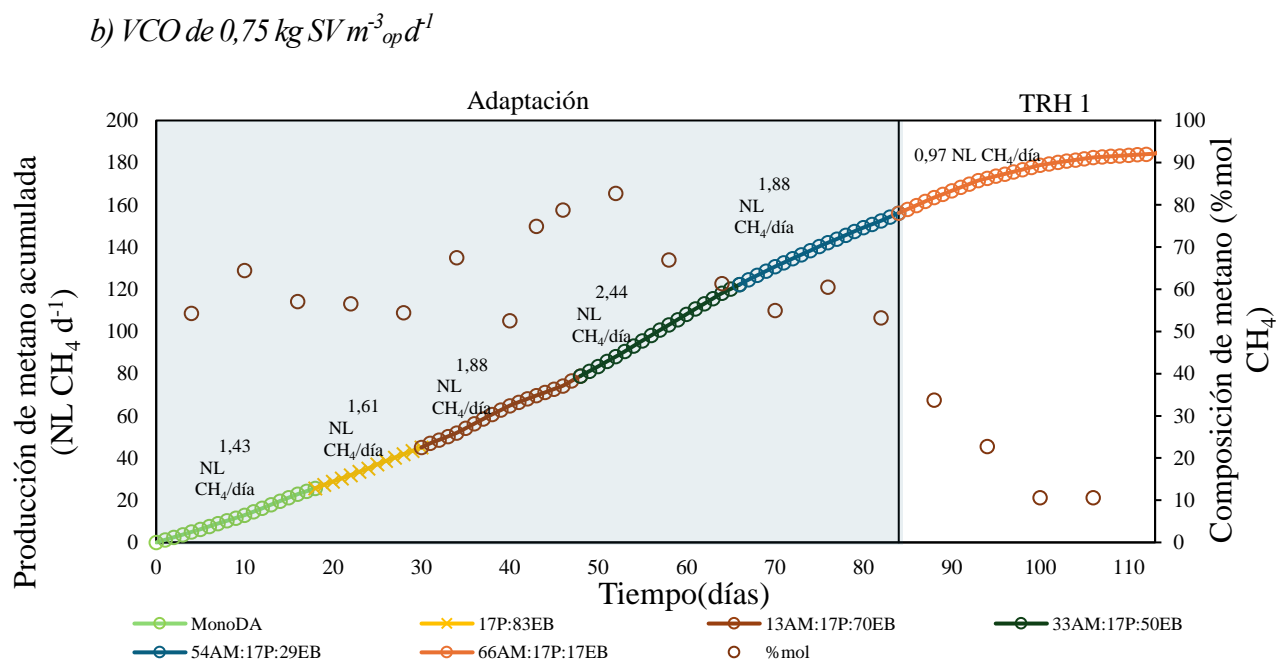
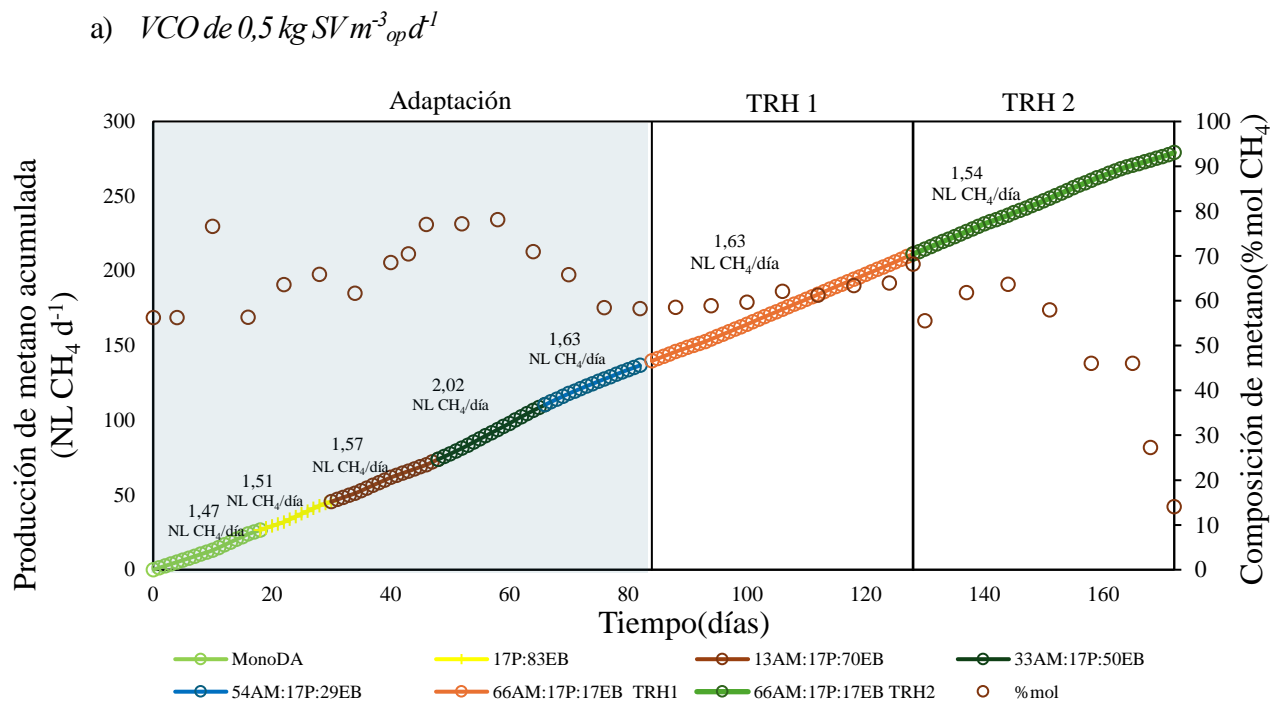
La composición de los sustratos desempeñó un papel clave en la eficiencia del proceso. Durante la etapa inicial con la mezcla 17P:83EB, las bajas remociones de 11,19% y 9,02% para BD1 y BD2, respectivamente, se asociaron a una sinergia desfavorable entre los sustratos. Esto podría deberse a la alta concentración de material lignocelulósico presente en la pulpa de café, el cual es conocido por su baja biodegradabilidad anaerobia y por requerir tiempos prolongados de retención para su degradación efectiva (Quintero et al., 2012; Martí Herrero, 2019). Conforme se incorporaron las aguas mieles a las mezclas, se observó una mejora en la remoción, lo que destaca el efecto positivo de estos compuestos ricos en azúcares simples y fácilmente biodegradables sobre la actividad microbiana.

5.1.3 Producción de biogás

El monitoreo de la producción de metano en procesos de DA es fundamental, ya que este parámetro refleja directamente la eficiencia del bioproceso en la conversión de materia orgánica en energía aprovechable. En la **Figura 7** se presenta la producción acumulada de metano y su composición molar en los biodigestores, para las velocidades de carga orgánica evaluadas.

Figura 7

Producción de metano acumulada (ordenada izquierda) y su composición molar (ordenada derecha) para las velocidades de carga orgánica evaluadas. 7a. VCO de $0,5 \text{ kg SV m}^{-3} \text{ op d}^{-1}$ y 7b. VCO de $0,75 \text{ kg SV m}^{-3} \text{ op d}^{-1}$



La **Figura 7** evidencia diferencias claras en la estabilidad y eficiencia del proceso de DA bajo las dos VCO evaluadas. A una VCO de $0,5 \text{ kg SV m}^{-3} \text{ op d}^{-1}$ (**Figura 7.a**), se observa una mayor producción acumulada de metano, alcanzando $276,9 \text{ NL CH}_4$ al final del periodo evaluado. En contraste, bajo una VCO de $0,75 \text{ kg SV m}^{-3} \text{ op d}^{-1}$ (**Figura 7.b**), la producción de metano fue considerablemente menor, limitándose a 184 NL CH_4 . Esto indica que el incremento de la VCO afectó negativamente la eficiencia del sistema, lo cual está relacionado con una mayor acumulación de materia orgánica y producción excesiva de ácidos grasos volátiles (AGV).

El BD1 mantuvo una producción estable durante el período de adaptación y el primer TRH. Sin embargo, en el segundo TRH, se detectó una disminución gradual en la composición molar de metano, desde el día 158 alcanzando una composición molar de $46,05 \text{ \%mol CH}_4$. Esto puede atribuirse a la acumulación de materia orgánica (26%) dentro del biodigestor durante sus dos TRH, que, aunque, presente, fue menos severa que en el caso del BD2, donde la acumulación alcanzó el 27% en un solo TRH, siendo insuficiente para asimilarla. Esto hizo que la composición molar de metano disminuyera de manera más temprana y abrupta, llegando a valores de $10,65 \text{ \%mol CH}_4$ al día 106.

Los resultados muestran que, en el BD1, las mezclas con mejor rendimiento fueron (33AM:17P:50EB %SV) y (54AM:17P:29 EB %SV) con rendimientos de $2,02$ y $1,63 \text{ NL CH}_4 \text{ d}^{-1}$, respectivamente. Esto sugiere que estas combinaciones podrían ser una alternativa para evitar la inhibición observada durante la mezcla (66AM:17P:17EB %SV). Aunque la mezcla sinérgica alcanzó una alta producción acumulada de metano durante el primer TRH, problemas asociados a la acumulación de compuestos inhibitorios impidieron mantener el rendimiento a lo largo del tiempo. En el caso del BD2, las mezclas también mostraron comportamientos diferenciados. Sin embargo, los efectos inhibitorios fueron más evidentes en este biodigestor debido a la sobrecarga del sistema, resultando en una caída significativa en la composición molar de metano a partir del día 88.

La acumulación de AGV, producto de la sobrecarga de orgánica y la acidificación del medio, fue el principal factor limitante del proceso en ambas VCO, aunque con mayor impacto en el BD2. La literatura reporta que un exceso de AGV, especialmente de ácido acético y ácido propiónico, pueden inhibir severamente la actividad de los microorganismos metanogénicos (Amani et al., 2010). Esta inhibición se reflejó en la reducción drástica de la producción de biogás y la disminución de la estabilidad del proceso.

5.1.4 Eficiencias operacionales en la CoDA de residuos de café con estiércol bovino

En la **Tabla 7**, se presenta las eficiencias operacionales para ambas cargas orgánicas en cada relación de mezcla. Las mayores eficiencias del bioproceso se alcanzaron durante el periodo de adaptación, con el BD1 mostrando un desempeño superior a lo largo de todo el monitoreo.

Tabla 7

Eficiencias operacionales del bioproceso y biodigestor para las velocidades de carga orgánica evaluadas

| Relación de mezcla | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 TRH 1 | 6 TRH 2 |
|---|--|---------------------------|--------------------------|--------------|--------------|--------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Parámetro | VCO (kgSVm ⁻³ _{op} *d) | MonoDA | CoDA binaria 17:83 | 13:17:70 | 33:17:50 | 54:17:29 | CoDA terciaria 66:17:17 | CoDA terciaria 66:17:17 |
| | Eficiencia del bioproceso (m ³ CH ₄ kg ⁻¹ SV d ⁻¹) | 0,5 0,75 | 0,62 0,38 | 0,69 0,45 | 0,69 0,54 | 0,94 0,71 | 0,81 0,59 | 0,76 0,30 |
| Eficiencia del biodigestor (m ³ _{biogás} m ⁻³ _{digestor} d ⁻¹) | 0,5 0,75 | 0,42 0,44 | 0,44 0,50 | 0,46 0,55 | 0,48 0,55 | 0,49 0,56 | 0,49 0,50 | 0,47 - |

El BD1 mantuvo una eficiencia estable del bioproceso, registrando valores de 0,76 y 0,71 m³CH₄ kg⁻¹ SV d⁻¹ para el primer y segundo TRH de la mezcla sinérgica. Estas eficiencias superan a las reportadas en investigaciones previas sobre residuos de café. Armenta & Matiz (2024) evaluaron la CoDA de residuos de café con estiércol bovino en condiciones similares, obteniendo una eficiencia de 0,62 m³CH₄ kg⁻¹ SV d⁻¹ en un TRH con una VCO de 0,5 kg SV m⁻³_{op}d⁻¹. Por su parte, Gómez-Salcedo et al., (2021) lograron valores de 0,22 y 0,48

$\text{m}^3_{\text{CH}_4} \text{kg}^{-1} \text{SV d}^{-1}$ para la CoDA de pulpa y estiércol bovino en operación semicontinua. Esto demuestra que la inclusión de aguas mieles mejora estadísticamente el rendimiento del sistema.

En cuanto a la eficiencia del biodigestor, durante el período de adaptación, el BD2 presentó una mayor eficiencia, atribuida a su mayor carga orgánica, lo que favoreció una producción inicial más alta de biogás. Sin embargo, se observó una menor calidad del biogás generado en el BD2 (% CH_4) y una disminución estadística en la producción de biogás durante el primer TRH de la mezcla sinérgica. Esto sugiere un desequilibrio en la etapa metanogénica y problemas de estabilidad asociados a la sobrecarga orgánica.

El BD1, por su parte, también mostró una eficiencia estable en la producción de biogás durante su operación, con un valor promedio de $0,46 \text{ m}^3_{\text{biogás}} \text{ m}^{-3}_{\text{digestor}} \text{ d}^{-1}$. Esta eficiencia supera los valores reportados por (Castro, Carballo, et al., 2017) y (Castro, Escalante, et al., 2017), quienes obtuvieron valores de 0,22 y $0,13 \text{ m}^3_{\text{biogás}} \text{ m}^{-3}_{\text{digestor}} \text{ d}^{-1}$ para la MonoDA de estiércol bovino con VCO de 1,05 y $7 \text{ kg SV m}^{-3}_{\text{op}} \text{ d}^{-1}$, respectivamente.

Aunque los resultados del BD2 fueron menos eficientes, el desempeño del BD1 bajo condiciones de VCO de $0,5 \text{ kg SV m}^{-3}_{\text{op}} \text{ d}^{-1}$, demostró el potencial de la CoDA para tratar residuos de café. No obstante, debido a la sobresaturación de materia orgánica y de compuestos inhibitorios, el bioproceso presenta problemas de estabilidad que dificultan su implementación durante períodos de tiempo prolongados. Esta limitación podría abordarse mediante la aplicación de estrategias enfocadas en mejorar la degradación de fracciones lignocelulósicas y mediante el estudio de otra relación de mezcla que permita optimizar la producción de metano y lograr una estabilización a largo plazo.

5.2 Evaluación de la estabilidad del bioproceso

5.2.1 Indicadores de alerta temprana

Para evitar la inhibición en procesos de digestión, es fundamental implementar un monitoreo continuo que permita identificar de manera temprana posibles desequilibrios en el sistema. En este sentido, el uso de

indicadores de alerta temprana (IAT) desempeñan un papel importante al facilitar la identificación oportuna del estado del biodigestor. En este estudio, se evaluó la estabilidad del bioproceso a través del análisis de la producción de ácidos grasos volátiles, las alcalinidades del sistema y la capacidad buffer, lo que permitió una evaluación integral del desempeño del proceso.

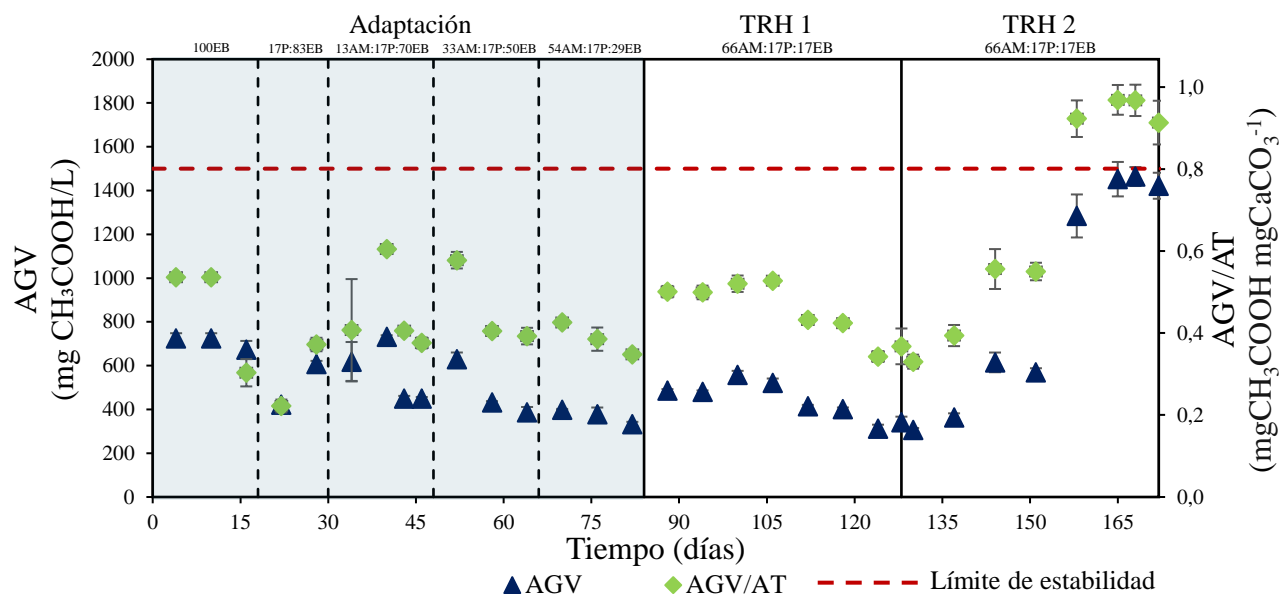
Respecto a la capacidad buffer (AGV/AT), esta indica la cantidad de ácidos que el lodo efluente puede neutralizar sin alterar significativamente su pH. Este indicador es esencial para determinar si el sistema mantiene un equilibrio metabólico adecuado. Según la literatura, la relación AGV/AT en el rango de 0,1 a 0,8 asegura una estabilización apropiada del sistema, lo que favorece condiciones óptimas para el desempeño de los microorganismos metanogénicos (Elbeshbishy & Nakhla, 2011; Shahriari et al., 2013).

Por su parte, la producción de ácidos grasos volátiles (AGV) es un indicador clave en procesos de DA, ya que estos ácidos son productos intermedios generados durante la degradación de materia orgánica compleja en ácidos más simples, como el ácido acético. La acumulación excesiva de AGV puede indicar desequilibrios metabólicos, aumentando el riesgo de acidificación y afectando la actividad de los microorganismos metanogénicos. En este contexto, la **Figura 8** muestra la evolución de la producción de AGV y la capacidad buffer durante todo el monitoreo.

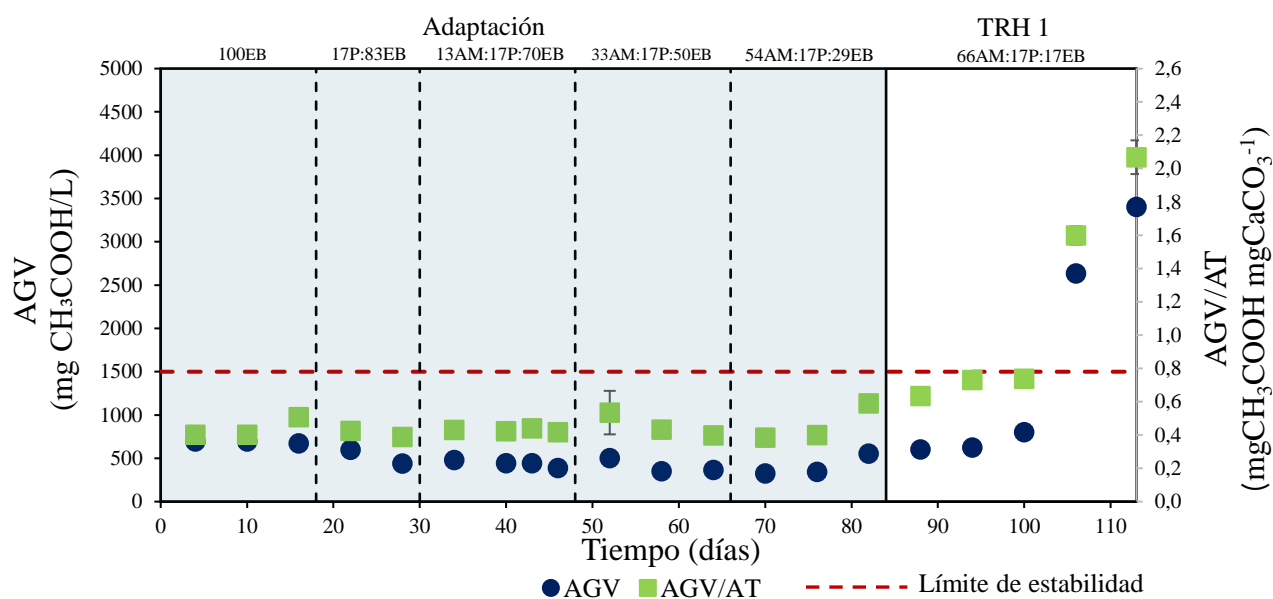
Figura 8

Evolución de la producción de AGV (ordenada izquierda) y la capacidad buffer (ordenada derecha). 8a. VCO de 0,5 kg SV m⁻³ op d⁻¹ y 8b. VCO de 0,75 kg SV m⁻³ op d⁻¹

a) VCO de 0,5 kg SV m⁻³ op d⁻¹



b) VCO de $0,75 SV m^3 op d^{-1}$



Durante las cinco fases del período de adaptación, se observó una estabilidad entre las fases ácida y alcalina en ambos biodigestores. Los valores promedio de la capacidad buffer fueron de $0,42 \pm 0,02$ y $0,44 \pm 0,03$ $mg CH_3COOH mg CaCO_3^{-1}$ para las VCO de 0,5 y 0,75 $kg SV m^3 op d^{-1}$ respectivamente, lo cual evidencia la capacidad de amortiguamiento aportada por el estiércol bovino al proceso. Adicionalmente, se evidenció que la

concentración de ácidos grasos volátiles (AGV) se mantuvo por debajo del límite crítico de 1500 mg/L (Søndergaard et al., 2015), lo que refleja un sistema estable durante esta etapa.

Durante el monitoreo del primer TRH de la mezcla sinérgica, el BD1 (VCO de 0,5 kg SV m⁻³ op d⁻¹) se mantuvo estable, presentando un valor de capacidad buffer de 0,45±0,02 mgCH₃COOH mgCaCO₃⁻¹ y un contenido de AGV de 439,50±86,58 mgCH₃COOH/L. Sin embargo, se observó inestabilidad durante el segundo TRH, específicamente en el día 158, cuando se registró una capacidad buffer de 0,92±0,04 mgCH₃COOH mgCaCO₃⁻¹ y un aumento en la concentración de AGV, alcanzando hasta 1284 mg CH₃COOH/L, un valor cercano al límite de falla. Estos resultados evidencian que la mezcla no es adecuada para mantener la estabilidad a largo plazo.

En el caso del BD2 (VCO de 0,75 kg SV m⁻³ op d⁻¹), se presentó inestabilidad en el primer TRH, específicamente el día 106, cuando la capacidad buffer aumentó a 1,6±0,03 mgCH₃COOH mgCaCO₃⁻¹ y la concentración de AGV alcanzó 2636 mg CH₃COOH/L. El monitoreo continuó hasta el día 113, momento en el cual se registró un incremento en la capacidad buffer, alcanzando 2,07±0,05 mgCH₃COOH mgCaCO₃⁻¹, y un aumento en la concentración de AGV hasta 3404 mg CH₃COOH/L, lo que llevó a la decisión de detener la operación del biodigestor.

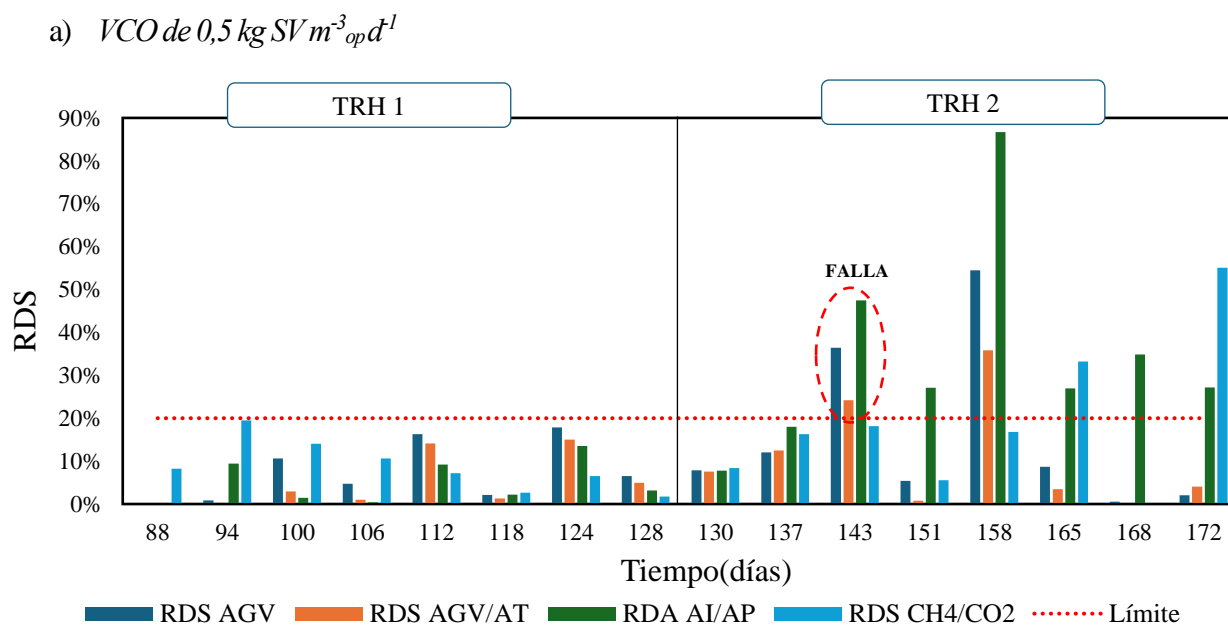
Los resultados indican que la VCO influye directamente en la estabilidad del bioproceso. Una carga orgánica más baja favorece un equilibrio más prolongado, mientras que una mayor carga provoca una acumulación de AGV más rápida y difícil de controlar. Las fallas observadas en ambos biodigestores se explican por la acumulación excesiva de AGV, que superó la capacidad de las bacterias acetogénicas para consumirlos. Este desequilibrio afectó la cinética de producción de metano por parte de las arqueas metanogénicas (Owamah & Izinyon, 2015). Como consecuencia, la alcalinidad del sistema no fue suficiente para contrarrestar la acidificación, lo que provocó inestabilidad irreversible en los sistemas estudiados.

Adicionalmente, dado que en sistemas estabilizados la producción de metano, los AGV y la alcalinidad no deberían presentar grandes variaciones a lo largo del tiempo, se consideró la desviación estándar relativa (RDS) como herramienta estadística para identificar perturbaciones en el bioproceso. Además, se incluyó la relación de alcalinidades (AI/AP), que refleja simultáneamente la generación de ácidos orgánicos y la capacidad buffer (Alvarado, 2021), así como la relación CH_4/CO_2 , ya que, en procesos de DA, cuando ocurre acidificación, el contenido de CH_4 disminuye y el de CO_2 aumenta (Li et al., 2017).

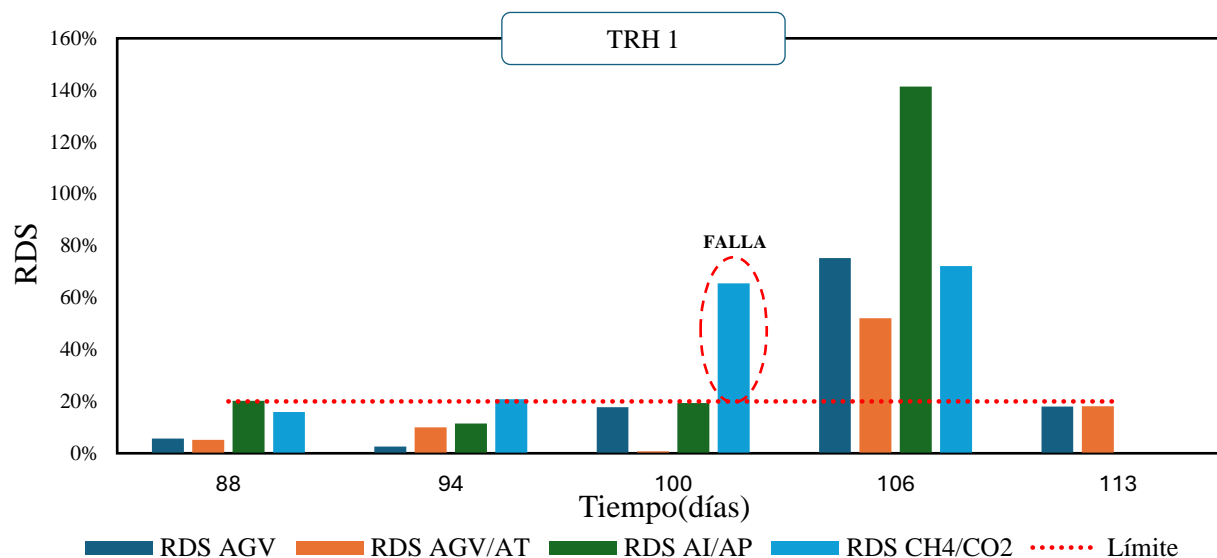
En la **Figura 9**, se muestra la desviación estándar relativa (RSD) para ambas cargas orgánicas evaluadas en la mezcla sinérgica.

Figura 9

Desviación estándar relativa durante la CoDA de la mezcla sinérgica. 9a. VCO de $0,5 \text{ kg SV m}^{-3} \text{ op d}^{-1}$ y 9b. VCO de $0,75 \text{ kg SV m}^{-3} \text{ op d}^{-1}$



b) VCO de $0,75 \text{ kg SV m}^{-3} \text{ op d}^{-1}$



En la **Figura 9** se evidencia que, en el BD1 (VCO de $0,5 \text{ kg SV m}^{-3} \text{ op d}^{-1}$), se presentaron fallas desde el día 143 durante el segundo TRH, cuando la RSD de los AGV y de las relaciones AI/AP y CH₄/CO₂ superaron el umbral del 20%, siendo la relación AI/AP la más sensible a la perturbación, con una desviación del 47%. Por otro lado, en el BD2 (VCO de $0,75 \text{ kg SV m}^{-3} \text{ op d}^{-1}$), la falla ocurrió desde día 100, cuando la relación CH₄/CO₂ alcanzó una desviación estándar del 65%.

La efectividad de los indicadores de alerta temprana (IAT), evaluada mediante la desviación estándar, depende tanto de la VCO como del TRH. En el caso del BD1, fue posible predecir la inestabilidad con suficiente antelación, incluso antes de que se observara una caída significativa en la producción de metano. En cambio, en el BD2, operado con una VCO mayor y un TRH menor, los IAT detectaron la falla cuando el sistema ya estaba inhibido, con concentraciones de metano muy bajas.

5.2.2 Ácidos grasos volátiles como inhibidores del proceso de CoDA

Los ácidos grasos volátiles (AGV) son intermediarios clave en el proceso de digestión anaerobia, por lo que es fundamental monitorear su evolución. Desempeñan un papel fundamental en el control y monitoreo de los biodigestores anaerobios, ya que responden rápidamente a las variaciones en las condiciones del sistema.

Diversos estudios han establecido concentraciones críticas de AGV cuya acumulación pueden generar inestabilidad en los biodigestores, reflejándose en una disminución significativa en la producción de metano. Hill et al., (1987) determinaron que un aumento en la concentración de ácido acético a 853,3 mg DQO L⁻¹ y una relación P/A de 1,4 pueden ocasionar problemas en la fase metanogénica. Por su parte, Li et al., (2017) identificaron límites para los ácidos propiónico, butírico e isovalérico de 121,08, 18,18 y 20,39 mg DQO L⁻¹, respectivamente. Asimismo, Hill & Bolte, (1989) definieron concentraciones críticas para los ácidos isobutírico e isovalérico de 27,27 y 30,58 mg DQO L⁻¹, indicando que niveles superiores a estos generan fallas inminentes en los biodigestores, incluyendo la formación de espuma. Además, señalaron que concentraciones de 9,09 y 10,19 mg DQO L⁻¹ para los ácidos isobutírico e isovalérico, respectivamente, pueden utilizarse como indicadores para predecir fallas de manera temprana en los biodigestores.

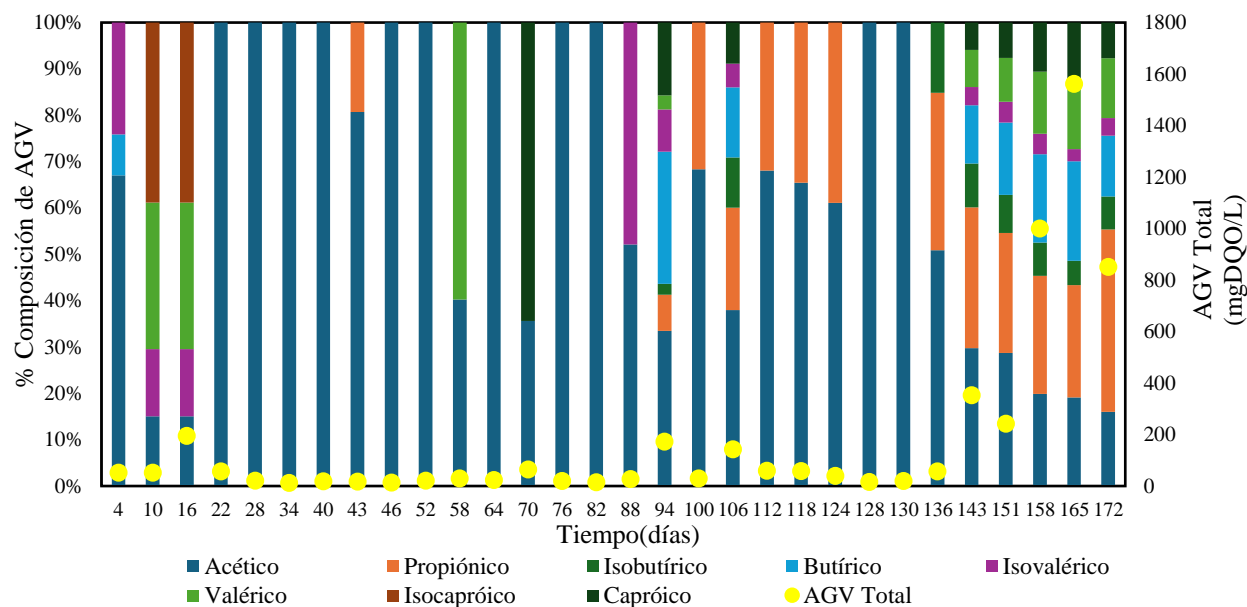
En la **Figura 10** se muestra el comportamiento individual de la producción de AGV para las velocidades de carga evaluadas durante la etapa de adaptación y en la mezcla sinérgica, medido mediante cromatografía de gases.

Figura 10

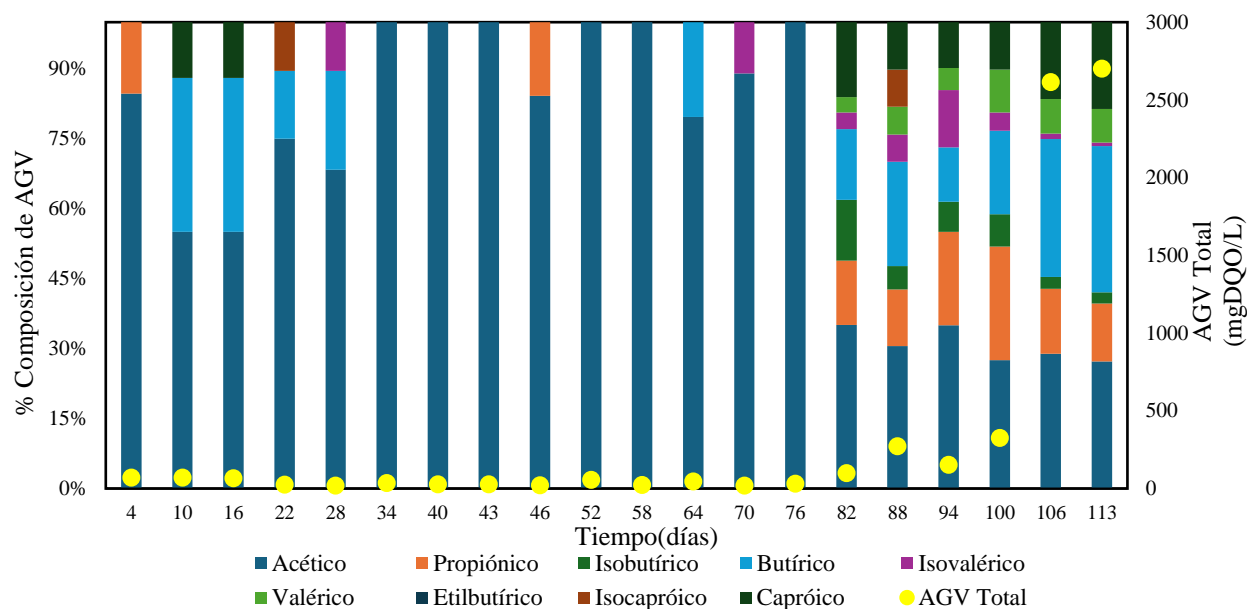
Composición de AGV (eje principal) y concentración total de AGV (eje secundario). 10a. VCO de 0,5 kg SV m³ op d⁻¹

10b. VCO de 0,75 kg SV m³ op d⁻¹

a) VCO de 0,5 kg SV m³ op d⁻¹



b) VCO de $0,75 \text{ kg SV m}^{-3} \text{ op d}^{-1}$



Las concentraciones presentadas en la **Figura 10** reflejan la evolución del proceso de DA durante la acidogénesis y su conversión hacia la metanogénesis. Durante el periodo de adaptación, la concentración de AGV permaneció baja en ambos biodigestores ($< 200 \text{ mg DQO L}^{-1}$), con predominancia en la producción de

ácido acético, alcanzando valores de 76,91% para el BD1 y 81,74% para el BD2. Esto indica que los AGV fueron eficientemente convertidos en ácido acético, el cual es el principal precursor en la generación de metano.

En el BD1 (VCO de $0.5 \text{ kg SV m}^{-3}_{\text{op}} \text{ d}^{-1}$), tanto durante el período de adaptación como en el primer TRH de la mezcla sinérgica, se registraron bajas concentraciones de AGV. Sin embargo, las fallas en el biodigestor comenzaron a manifestarse en el segundo TRH, a partir del día 143, cuando las concentraciones de los ácidos, butírico e isobutírico aumentaron hasta 44,37 y 33,13 mg DQO L^{-1} , respectivamente, superando las concentraciones críticas establecidas.

En el BD2 (VCO de $0,75 \text{ kg SV m}^{-3}_{\text{op}} \text{ d}^{-1}$), la inestabilidad fue evidente antes, identificándose el día 88 durante el primer TRH. En este punto, las concentraciones de los ácidos butírico, isobutírico e isovalérico alcanzaron valores de 60,84, 13,81 y 15,92 mg DQO L^{-1} , respectivamente.

En ambos biodigestores, el incremento en las concentraciones de los ácidos reflejó una acumulación progresiva en el sistema, evidenciando un desbalance en el consumo de los AGV. Este fenómeno sugiere una posible inhibición en las rutas metabólicas responsables de la conversión en ácido acético y metano, lo que apunta a la ocurrencia de inhibición cruzada entre los AGV (Jiménez-Páez et al., 2024). Como resultado, tanto la acidogénesis como la metanogénesis se vieron afectadas, comprometiendo finalmente la producción de metano.

La acumulación de AGV también demostró que la estabilidad en la producción no pudo mantenerse durante todo el monitorio en ninguno de los biodigestores. Este comportamiento se atribuye principalmente a la sobrecarga orgánica y a la acumulación de materia orgánica discutidos previamente. Estos resultados destacan la importancia del monitoreo de los indicadores de falla como herramienta fundamental para identificar problemas en el proceso de DA antes de que ocurra acidificación e inhibición posterior.

Finalmente, la **Tabla 8** resume los IAT evaluados en esta investigación, destacando cuáles fueron los más eficientes para predecir fallas en el sistema.

Tabla 8

Resumen de los IAT evaluados

| Indicador de alerta temprana | Unidad | 0,5 kg SV m ³ op d ⁻¹ | | 0,75 kg SV m ³ op d ⁻¹ | |
|---|--|---|---------------------------|--|---------------------------|
| | | Valor | Día de detección de falla | Valor | Día de detección de falla |
| Concentración AGV | mg CH ₃ COOH L ⁻¹ | 1284 | 158 | 2636 | 106 |
| Relación AGV/AT | mgCH ₃ COOH mgCaCO ₃ ⁻¹ | 0,92 | 158 | 1,6 | 106 |
| Relación AI/AP | %RDS | 47% | 143 | 141% | 106 |
| Relación CH ₄ /CO ₂ | %RDS | 36% | 143 | 75% | 100 |
| Ácido Propiónico | mg DQO L ⁻¹ | 254,84 | 158 | 363,23 | 106 |
| Ácido Isobutírico | mg DQO L ⁻¹ | 33,13 | 143 | 13,82 | 88 |
| Ácido Butírico | mg DQO L ⁻¹ | 44,37 | 143 | 60,84 | 88 |
| Ácido Isovalérico | mg DQO L ⁻¹ | 43,86 | 158 | 15,93 | 88 |
| Ácido Acético | mg DQO L ⁻¹ | - | - | 756,14 | 106 |

En la **Tabla 8** se destaca la efectividad de los IAT en el monitoreo del proceso de DA. En el caso del BD1, la inhibición se presentó en el día 158. Sin embargo, los IAT basados en titulación lograron prever la falla antes de que se registrara una disminución estadística en la producción de metano, destacando la relación AI/AP como la más sensible ante las perturbaciones.

Con respecto al BD2, las perturbaciones fueron más difíciles de anticipar. Solo a través del monitoreo detallado de los AGV individuales fue posible identificar las fallas en el sistema, permitiendo detectar indicios de inestabilidad antes de que, en el día 106, se produjera la acidificación e inhibición en el biodigestor.

6. Conclusiones

El análisis de la eficiencia del proceso de CoDA de residuos agroindustriales del café (pulpa y aguas mieles) con estiércol bovino en dos biodigestores tubulares a escala banco demostró que la mezcla sinérgica (66AM:17P:17EB%SV), operada a una VCO de $0,5 \text{ kg SV m}^{-3} \text{ op d}^{-1}$ logró una eficiencia de $0,76 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ SV d}^{-1}$. Esta condición permitió alcanzar una producción acumulada de metano de 279,162 NL CH_4 , superando en un 51,45% a la producción obtenida con una VCO de $0,75 \text{ kg SV m}^{-3} \text{ op d}^{-1}$.

La estabilidad del sistema de CoDA de los residuos de café (pulpa y aguas mieles) con estiércol bovino se vio afectada por la acumulación de AGV. Los IAT demostraron ser efectivos para detectar estos desequilibrios en el biodigestor operado a una VCO de $0,5 \text{ kg SV m}^{-3} \text{ op d}^{-1}$. En esta condición, se logró estabilidad durante un TRH de 44 días con una carga de ácidos de $528 \pm 140 \text{ g CH}_3\text{COOH L}^{-1}$, mientras que la operación con una VCO de $0,75 \text{ kg SV m}^{-3} \text{ op d}^{-1}$ indujo inhibición temprana debido a una carga excesiva de AGV de $3404 \pm 48,5 \text{ g CH}_3\text{COOH L}^{-1}$ durante su primer TRH.

7. Recomendaciones

Continuar la investigación usando la VCO de $0,5 \text{ kg SV m}^{-3} \text{ op}^* \text{ d}$, implementando una etapa de adaptación y utilizando la mezcla 54AM:17P:29EB %SV. Esta estrategia podría optimizar la producción de metano, disminuir el riesgo de acidificación y lograr una estabilización a largo plazo.

Considerar el uso de la pulpa como soporte orgánico en el sistema y no como co-sustrato, debido a que podría contribuir a estabilización en la producción de ácidos grasos volátiles y a mantener mayor rendimiento en el proceso.

Referencias bibliográficas

- Acosta, N., Duh Kang, I., Rabaey, K., & De Vrieze, J. (2021). Cow manure stabilizes anaerobic digestion of cocoa waste. *Waste Management*, *126*, 508–516. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.02.010>
- Adnane, I., Taoumi, H., Elouahabi, K., Lahrech, K., & Oulmekki, A. (2024). Valorization of crop residues and animal wastes: Anaerobic co-digestion technology. In *Heliyon* (Vol. 10, Issue 5). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26440>
- Alvarado, M. (2021). *EVALUACIÓN DE INDICADORES DE ALERTA TEMPRANA EN PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS*.
- Álvarez, J., Díaz, E., León, N., & Guillén, J. (2010). ENMIENDAS ORGÁNICAS Y ACTIVIDAD METABÓLICA DEL SUELO EN EL RENDIMIENTO DE MAÍZ. . *Terra Latinoamericana*, *28*(3), 239–245.
- Amani, T., Nosrati, M., & Sreekrishnan, T. R. (2010). Anaerobic digestion from the viewpoint of microbiological, chemical, and operational aspects - A review. In *Environmental Reviews* (Vol. 18, Issue 1, pp. 255–278). National Research Council of Canada. <https://doi.org/10.1139/A10-011>
- Angelidaki, I., Karakashev, D., Batstone, D. J., Plugge, C. M., & Stams, A. J. M. (2011). Biomethanation and its potential. In *Methods in Enzymology* (Vol. 494, pp. 327–351). Academic Press Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385112-3.00016-0>
- Armenta, S., & Matiz, J. (2024). *Co-digestión anaeróbica de residuos de la cadena agroindustrial del café en operación semicontinua a escala laboratorio*.
- Battista, F., Fino, D., & Mancini, G. (2016). Optimization of biogas production from coffee production waste. *Bioresource Technology*, *200*, 884–890. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.11.020>

- Campos, R. C., Pinto, V. R. A., Melo, L. F., Rocha, S. J. S. S. da, & Coimbra, J. S. (2021). New sustainable perspectives for “Coffee Wastewater” and other by-products: A critical review. In *Future Foods* (Vol. 4). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100058>
- Castro, L., Carballo, M., Martí-Herrero, J., & Escalante, H. (2017). *Monitoreo a escala real de un digester anaeróbico de bajo costo instalado en una planta de sacrificio animal*.
- 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>
- Chen, Y., Cheng, J. J., & Creamer, K. S. (2008). Inhibition of anaerobic digestion process: A review. In *Bioresource Technology* (Vol. 99, Issue 10, pp. 4044–4064). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.057>
- Corro, G., Pal, U., Bañuelos, F., & Rosas, M. (2013). Generation of biogas from coffee-pulp and cow-dung co-digestion: Infrared studies of postcombustion emissions. *Energy Conversion and Management*, 74, 471–481. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.07.017>
- Di, W., Lei, L., Xiaofei, Z., Yun, P., Pingjin, Y., & Xuya, P. (2019). Anaerobic digestion: A review on process monitoring. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 103, 1–12. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.039>.
- Elbeshbishy, E., & Nakhla, G. (2011). Comparative study of the effect of ultrasonication on the anaerobic biodegradability of food waste in single and two-stage systems. *Bioresource Technology*, 102(11), 6449–6457. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.03.082>

- Fan, L., Soccol, A. T., Pandey, A., Vandenberghe, L. P. D. S., & Soccol, C. R. (2006). Effect of caffeine and Tannins on cultivation and fructification of *Pleurotus* on coffee husks. *Brazilian Journal of Microbiology*, 37(4), 420–424. <https://doi.org/10.1590/S1517-83822006000400003>
- Federación nacional de cafeteros de Colombia. (2024). *Informe de producción de café en 2024*.
- Feliu Jofre, & Flotats Ripoll. (2019). Los gases renovables: un vector energético emergente. *Fundación Naturgy*.
- Fernández Rodríguez, J., Pérez, M., & Romero, L. I. (2012). Mesophilic anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste: Optimisation of the semicontinuous process. *Chemical Engineering Journal*, 193–194, 10–15. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.04.018>
- Ferrer, I., Vázquez, F., & Font, X. (2010). Long term operation of a thermophilic anaerobic reactor: Process stability and efficiency at decreasing sludge retention time. *Bioresource Technology*, 101(9), 2972–2980. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.006>
- Gómez-Salcedo, Y., Baquerizo-Crespo, R., Da Silva, A. J., Oliva-Merencio, D., & Pereda-Reyes, I. (2021). Anaerobic digestion of solid wastes from coffee wet processing. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 37, 281–292. <https://doi.org/10.20937/RICA.53753>
- Grangeiro, L. C., Almeida, S. G. C. de, Mello, B. S. de, Fuess, L. T., Sarti, A., & Dussán, K. J. (2019). New trends in biogas production and utilization. In *Sustainable Bioenergy: Advances and Impacts* (pp. 199–223). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817654-2.00007-1>
- Guerrero, E., & Ocampo, S. (2023). *Efectos sinérgicos de la co-digestión anaeróbica de aguas mieles y pulpa de café con estiércol bovino*.
- Gutiérrez, C., Rodríguez, L. A., García, J. F., & Feregrino, A. A. (2020). Revalorización de residuos del cultivo de café: rumbo a una economía circular. *DIGITAL CIENCIA*, 71–79.

- Hernández-Sarabia, M., Sierra-Silva, J., Delgadillo-Mirquez, L., Ávila-Navarro, J., & Carranza, L. (2021a). The potential of the biodigester as a useful tool in coffee farms. *Applied Sciences (Switzerland)*, *11*(15). <https://doi.org/10.3390/app11156884>
- Hernández-Sarabia, M., Sierra-Silva, J., Delgadillo-Mirquez, L., Ávila-Navarro, J., & Carranza, L. (2021b). The potential of the biodigester as a useful tool in coffee farms. *Applied Sciences (Switzerland)*, *11*(15). <https://doi.org/10.3390/app11156884>
- Hill, D. T., & Bolte, J. P. (1989). Digester Stress as Related to Iso-butyric and Iso-valeric Acids*. In *Biological Wastes* (Vol. 28).
- Hill, D. T., Cobb, S. A., Bolte, J. P., & Asae, A. M. (1987). *Using Volatile Fatty Acid Relationships to Predict Anaerobic Digester Failure*.
- Jaimés-Estévez, J., Mercado, E. V., Jaramillo, J. G., Rodríguez, P., Martí-Herrero, J., Escalante, H., & Castro, L. (2022a). 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>
- Jaimés-Estévez, J., Mercado, E. V., Jaramillo, J. G., Rodríguez, P., Martí-Herrero, J., Escalante, H., & Castro, L. (2022b). 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>
- Jiménez-Páez, E., Ding, F., Feroso, F. G., & García-Martín, J. F. (2024). Monitoring of volatile fatty acids during anaerobic digestion of olive pomace by means of a hand held near infrared spectrometer. *Science of the Total Environment*, *955*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176979>

- Li, D., Lin, C., Xiaofeng, L., Zili, M., Haiwei, R., Qin, C., & Zhiying, Y. (2017). Instability mechanisms and early warning indicators for mesophilic anaerobic digestion of vegetable waste. *Bioresource Technology*.
- Li, D., Ran, Y., Chen, L., Cao, Q., Li, Z., & Liu, X. (2018). Instability diagnosis and syntrophic acetate oxidation during thermophilic digestion of vegetable waste. *Water Research*, 139, 263–271. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.04.019>
- Manyi-Loh, C. E., & Lues, R. (2023). Anaerobic Digestion of Lignocellulosic Biomass: Substrate Characteristics (Challenge) and Innovation. In *Fermentation* (Vol. 9, Issue 8). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/fermentation9080755>
- Mao, C., Feng, Y., Wang, X., & Ren, G. (2015). Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 45, pp. 540–555). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.032>
- Martí Herrero, J. (2019). *Biodigestores Tubulares: Guía de Diseño y Manual de Instalación*.
- Martí-Herrero, J., Ceron, M., Garcia, R., Pracejus, L., Alvarez, R., & Cipriano, X. (2015). The influence of users' behavior on biogas production from low cost tubular digesters: A technical and socio-cultural field analysis. *Energy for Sustainable Development*, 27, 73–83. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2015.05.003>
- Martínez, A., Speranza, M., Ruíz, F., Camarero, S., Guillén, F., Martínez, J. M., Gutiérrez, A., & C.del Río, J. (2005). Biodegradation of lignocelluloses: microbial, chemical, and enzymatic aspects of the fungal attack of lignin. *International Microbiology*, 8, 195–204.
- Miramontes, Rodríguez, Alvarado, Escamilla, & Albalade. (2023). Evaluación de la capacidad predictiva de indicadores de alerta para la detección de fallas en la producción de biogás. *RedBioLAC*, 7, 58–60.

- Moral, R., Perez-Murcia, M. D., Perez-Espinosa, A., Moreno-Caselles, J., Paredes, C., & Rufete, B. (2008). Salinity, organic content, micronutrients and heavy metals in pig slurries from South-eastern Spain. *Waste Management*, 28(2), 367–371. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.01.009>
- Owamah, H. I., & Izinyon, O. C. (2015). The effect of organic loading rates (OLRs) on the performances of food wastes and maize husks anaerobic co-digestion in continuous mode. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 11, 71–76. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2015.06.002>
- Paredes, J., Pretell, V., Pilco, A., Ramos, W., & Ubillas, C. (2022). Characterization of Two Lignocellulosic Biomasses Coffea Arabica L. for the production of Biochar. *Proceedings of the LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology*, 2022-July. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.344>
- Pereira, E., Montenegro, C., & Monterani, F. (2009). A tecnologia de remoção de fósforo: Gerenciamento do elemento em resíduos industriais. *Revista Ambiente e Agua*, 9(3), 445–458. <https://doi.org/10.4136/1980-993X>
- Pinto, J. A., Barros, R. M., dos Santos, I. F. S., Filho, G. L. T., de Oliveira Botan, M. C., Bôas, T. F. V., & de Cássia Crispim, A. M. (2023). Study of the anaerobic co-digestion of bovine and swine manure: Technical and economic feasibility analysis. *Cleaner Waste Systems*, 5. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2023.100097>
- Quintero, M., Castro, L., Ortiz, C., Guzmán, C., & Escalante, H. (2012). Enhancement of starting up anaerobic digestion of lignocellulosic substrate: Figue's bagasse as an example. *Bioresource Technology*, 108, 8–13. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.12.052>
- Rattan, S., Parande, A. K., Nagaraju, V. D., & Ghiwari, G. K. (2015). A comprehensive review on utilization of wastewater from coffee processing. In *Environmental Science and Pollution Research* (Vol. 22, Issue 9, pp. 6461–6472). Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4079-5>

- Rivera González, D., Plata Martínez, L., Castro Molano, L., Carolina, ;, Luna, G., & Escalante Hernández, H. (2012). Aprovechamiento del subproducto sólido de la digestión anaerobia del bagazo de fique (*furcraea macrophylla*) para el acondicionamiento de suelos. *Revista ION*, 25(1). <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaion/article/view/2767>
- Rodrigo Sanz Uribe, J., Eugenio Oliveros Tascón, C., Augusto Ramírez Gómez, C., Esther Peñuela Martínez, A., & Jimena Ramos Giraldo, P. (2013). Proceso de beneficio. En Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, Manual del cafetero colombiano: Investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura(Vol.3,pp. 09-47). Cenicafé. *Cenicafé*. https://doi.org/10.38141/cenbook-0026_28
- Rodríguez Valencia, N., Sanz Uribe, J. R., Oliveros Tascón, C. E., & Ramírez Gómez, C. A. (2015). *Beneficio del café en Colombia*.
- Ruihong, Z., & Zhiqin, Z. (1999). Biogasification of rice straw with an anaerobic-phased solids digester system. *Bioresource Technology*, 68(3). [https://doi.org/doi.org/10.1016/S0960-8524\(98\)00154-0](https://doi.org/doi.org/10.1016/S0960-8524(98)00154-0)
- Selvankumar, T., Sudhakar, C., Govindaraju, M., Selvam, K., Aroulmoji, V., Sivakumar, N., & Govarthanam, M. (2017). Process optimization of biogas energy production from cow dung with alkali pre-treated coffee pulp. *3 Biotech*, 7(4). <https://doi.org/10.1007/s13205-017-0884-5>
- Shahriari, H., Warith, M., Hamoda, M., & Kennedy, K. (2013). Evaluation of single vs. staged mesophilic anaerobic digestion of kitchen waste with and without microwave pretreatment. *Journal of Environmental Management*, 125, 74–84. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.03.042>
- Søndergaard, M. M., Fotidis, I. A., Kovalovszki, A., & Angelidaki, I. (2015). Anaerobic Co-digestion of Agricultural Byproducts with Manure for Enhanced Biogas Production. *Energy and Fuels*, 29(12), 8088–8094. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b02373>

- Tafur, K. (2022). *Análisis del ciclo de vida de un sistema de producción de biogás empleando pulpa de café y aguas mieles*.
- Widjaja, T., Iswanto, T., Altway, A., Shovitri, M., & Juliastuti, S. R. (2017). Methane production from coffee pulp by microorganism of rumen fluid and cow dung in co-digestion. *Chemical Engineering Transactions*, 56, 1465–1470. <https://doi.org/10.3303/CET1756245>
- Yenigün, O., & Demirel, B. (2013). Ammonia inhibition in anaerobic digestion: A review. In *Process Biochemistry* (Vol. 48, Issues 5–6, pp. 901–911). <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2013.04.012>
- Zhang, J., Lv, C., Tong, J., Liu, J., Liu, J., Yu, D., Wang, Y., Chen, M., & Wei, Y. (2016). Optimization and microbial community analysis of anaerobic co-digestion of food waste and sewage sludge based on microwave pretreatment. *Bioresource Technology*, 200, 253–261. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.10.037>