

**EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN DE METANO A PARTIR DE
LA CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE DESECHOS ALIMENTICIOS COCIDOS
GENERADOS EN CAFETERÍAS DE INSTITUCIONES UNIVERSITARIAS**

VALENTINA BLANCO GONZÁLEZ ID: 000280899

NATHALIA PEÑA DAZA ID: 000245782

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL

BUCARAMANGA

2019

**EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN DE METANO A PARTIR DE
LA CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE DESECHOS ALIMENTICIOS COCIDOS
GENERADOS EN CAFETERÍAS DE INSTITUCIONES UNIVERSITARIAS**

VALENTINA BLANCO GONZÁLEZ ID: 000280899

NATHALIA PEÑA DAZA ID: 000245782

Trabajo de grado para optar por el título de INGENIERO AMBIENTAL

DIRECTOR

PhD. ALEXANDRA CERON VIVAS

PROFESORA FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL

BUCARAMANGA

2019

AGRADECIMENTOS

Agradecemos principalmente a Dios por permitirnos culminar esta importante etapa de nuestras vidas, escoger esta carrera con la cual podemos aportar al desarrollo sostenible y por habernos orientado durante nuestro proceso académico. A la Universidad Pontificia Bolivariana por darnos el espacio y los materiales necesarios para llevar a cabo esta investigación. A nuestras familias por ser el eje principal y el más grande apoyo para cumplir nuestras metas. A nuestra directora Alexandra Cerón Vivas, por aportarnos sus conocimientos y asesorarnos durante este periodo. Al Laboratorio de Estudios Ambientales y Naidu Villamizar por su acompañamiento y disposición para ayudarnos en la realización de este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. OBJETIVOS.....	3
1.1. Objetivo general	3
1.2. Objetivos específicos.....	3
2. MARCO DE REFERENCIA.....	4
2.1. ANTECEDENTES.....	4
2.2. MARCO TEÓRICO.....	6
2.2.1. Residuos sólidos orgánicos (RSO).....	6
2.2.1.1. Clasificación de los RSO.....	6
2.2.1.2. Propiedades biológicas de los RSO.....	7
2.2.1.3. Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos.....	7
2.2.1.4. Tipos de aprovechamiento que se logran a partir del tratamiento de los RSO..	8
2.2.2. Digestión Anaerobia	9
2.2.2.1. Hidrolisis	10
2.2.2.2. Acidogénesis o fermentación.....	11
2.2.2.3. Acetogénesis.....	11
2.2.2.4. Metanogénesis	11
2.2.3. Factores que influyen en la digestión anaerobia.....	12
2.2.3.1. Temperatura.....	12
2.2.3.2. pH	13
2.2.3.3. Alcalinidad.....	13
2.2.3.4. Humedad.....	13
2.2.3.5. Relación Sustrato/Inoculo.....	14
2.2.3.6. Agitación	14
2.2.3.7. Inóculos	15
2.2.3.8. Nutrientes.....	15
2.2.3.9. AGV'S.....	16
2.2.3.10. Relación C/N	16
2.2.4 Co-digestión Anaerobia.....	16

2.1.5.	Actividad Metanogénica Específica (AME).....	16
2.1.6.	Potencial Bioquímico de Metano (PBM).....	17
2.1.7.	Modelo Gompertz	20
3.	METODOLOGÍA.....	20
3.1.	CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA INICIALES DEL INÓCULO, SUSTRATO Y CO-SUSTRATOS UTILIZADOS PARA LA CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE DESECHOS ALIMENTICIOS COCIDOS.	21
3.1.1.	Inóculo.....	21
3.1.1.1.	Actividad Metanogénica Específica (AME).....	21
3.1.2.	Sustrato y co-sustratos	23
3.1.3.	Caracterización fisicoquímica de la mezcla sustrato/co-sustrato	24
3.2.	DISEÑO EXPERIMENTAL PARA EVALUACIÓN DEL TIPO Y PROPORCIÓN DEL CO-SUSTRATO EN LA PRODUCCIÓN DE METANO A PARTIR DE LA CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE DESECHOS ALIMENTICIOS COCIDOS	24
3.2.1.	Diseño estadístico	24
3.2.2.	Potencial Bioquímico de Metano (PBM)	26
3.2.3.	Modelo Gompertz.....	28
3.2.4.	Análisis de datos	29
4.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE DATOS	29
4.1.	CARACTERIZACIÓN DEL INÓCULO	29
4.1.1.	Caracterización fisicoquímica del inóculo	29
4.1.2.	Actividad Metanogénica Específica	30
4.2.	CARACTERIZACIÓN DEL SUSTRATO.....	32
4.2.1.	Caracterización fisicoquímica del sustrato	32
4.3.	CARACTERIZACIÓN DEL CO-SUSTRATO.....	34
4.3.1.	Caracterización fisicoquímica de jacinto de agua	34
4.3.2.	Caracterización fisicoquímica de residuos de poda.....	35
4.4.	CARACTERIZACIÓN DE LAS MEZCLAS SUSTRATO-COSUSTRATO	37
4.5.	INFLUENCIA DEL TIPO DE CO-SUSTRATO UTILIZADO EN LA CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE DESECHOS ALIMENTICIOS COCIDOS SOBRE LA PRODUCCIÓN DE METANO	37
4.5.1.	PBM Desechos Alimenticios Cocidos.....	37
4.5.2.	PBM Jacinto de Agua	39
4.5.3.	PBM Residuos de Poda	40

4.5.4. Influencia del tipo de co-sustrato.....	42
4.6. INFLUENCIA DE LA PROPORCIÓN DE LOS CO-SUSTRATOS UTILIZADOS EN LA CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE DESECHOS ALIMENTICIOS SOBRE LA PRODUCCIÓN DE METANO.	43
5. CONCLUSIONES.....	47

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Secuencia metabólica y grupos microbianos que intervienen en la DA.	10
Figura 2. Método volumétrico para la determinación del PBM.....	17
Figura 3. Método manométrico para la determinación del PBM	19
Figura 4. Botella experimental para prueba de PBM	22
Figura 5. Botellas experimentales para prueba de PBM.....	26
Figura 6. Volumen de metano a condiciones estándar para el inóculo.....	30
Figura 7. Volumen de metano a condiciones estándar de desechos alimenticios cocidos. ...	38
Figura 8. Volumen de metano a condiciones estándar de jacinto de agua.	39
Figura 9. Volumen de metano a condiciones estándar de residuos de poda.	41
Figura 10. Volumen de metano a condiciones estándar de residuos de poda y jacinto de agua.	42
Figura 11. Volumen experimental de metano a condiciones estándar de las mezclas.....	44

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos analizadas para inóculo.	21
Tabla 2. Cálculos para determinar AME.	22
Tabla 3. Parámetros fisicoquímicos analizados para sustrato y co-sustratos.	23
Tabla 4. Parámetros fisicoquímicos analizados para las mezclas.	24
Tabla 5. Diseño experimental.	25
Tabla 6. Mezclas experimentales para PBM.	27
Tabla 7. Cálculos para determinar PBM.	27
Tabla 8. Caracterización fisicoquímica del inóculo.	29
Tabla 9. Datos obtenidos del modelo Gompertz para AME.	31
Tabla 10. Caracterización fisicoquímica del sustrato.	32
Tabla 11. Caracterización fisicoquímica de jacinto de agua.	34
Tabla 12. Caracterización fisicoquímica de residuos de poda.	36
Tabla 13. Caracterización fisicoquímica de las mezclas.	37
Tabla 14. Datos obtenidos del modelo Gompertz para PBM de desechos cocidos.	38
Tabla 15. Datos obtenidos del modelo Gompertz para PBM de jacinto de agua.	40
Tabla 16. Datos obtenidos del modelo Gompertz para PBM de residuos de poda.	41
Tabla 17. Datos obtenidos del modelo Gompertz para PBM.	42
Tabla 18. Datos obtenidos del modelo Gompertz para las mezclas.	44

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Caracterización fisicoquímica.....	54
Anexo 2. Calculo AME.	55
Anexo 3. Gráficas volumen experimental y teórico a condiciones estándar de las mezclas.	58

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN DE METANO A PARTIR DE LA CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE DESECHOS ALIMENTICIOS COCIDOS GENERADOS EN CAFETERÍAS DE INSTITUCIONES UNIVERSITARIAS

AUTOR(ES): Valentina Blanco González
Nathalia Peña Daza

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Ambiental

DIRECTOR(A): Alexandra Cerón Vivas

RESUMEN

La co-digestión anaerobia es una variante de la digestión anaerobia, la cual consiste en mezclar dos o más sustratos con características complementarias para el tratamiento combinado y es conocida como una solución viable para superar las inhibiciones y mejorar el rendimiento del proceso. El objetivo de esta investigación fue evaluar la capacidad de producción de metano a partir de la co-digestión anaerobia de desechos alimenticios cocidos generados en una cafetería universitaria, utilizando una muestra de lodo anaerobio de una planta cervecera como inóculo. Se evaluaron dos co-sustratos (Jacinto de agua y residuos de poda) y dos proporciones de sustrato en la mezcla con el co-sustrato (20:80 y 30:70). Se calculó el PBM para cada condición evaluada y se determinó que la mezcla con mejor rendimiento fue la que utilizó residuos de poda en proporción 20CO:80PO, con un resultado de 141.35 ml CH₄/g SV. Sin embargo, este valor fue inferior al obtenido al utilizar cada residuo como único sustrato (PBM Residuos cocidos: 326 ml CH₄/g SV; Residuos de poda: 294 ml CH₄/g SV; Jacinto de agua: 197 ml CH₄/g SV). A partir de los resultados obtenidos se evidenció que, la digestión anaerobia de los residuos por separado puede ser más viable y eficiente que la co-digestión anaerobia de las mezclas.

PALABRAS CLAVE:

Co-digestión anaerobia de desechos alimenticios cocidos

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: EVALUATION OF METHANE PRODUCTION CAPACITY FROM ANAEROBIC CO-DIGESTION OF COOKED FOOD WASTE GENERATED IN UNIVERSITY CAFETERIAS

AUTHOR(S): Valentina Blanco González
Nathalia Pena Daza

FACULTY: Facultad de Ingeniería Ambiental

DIRECTOR: Alexandra Cerón Vivas

ABSTRACT

Anaerobic co-digestion is a variant of anaerobic digestion, which consists of mixing two or more substrates with complementary characteristics for combined treatment and is known as a viable solution to overcome inhibitions and improve process performance. The objective of this research was to evaluate the methane production capacity from the anaerobic co-digestion of cooked food waste generated in a university cafeteria, using a sample of anaerobic sludge from a brewery as inoculum. Two co-substrates (water hyacinth and pruning residues) and two proportions of substrate in the mixture with the co-substrate were evaluated (20:80 and 30:70). The PBM was calculated for each condition evaluated and it was determined that the mixture with the best performance was the one that used pruning residues in the proportion 20CO:80PO, with a result of 141.35 ml CH₄/g SV. However, this value was lower than the one obtained when using each residue as the only substrate (PBM Cooked residues: 326 ml CH₄/g SV; Pruning residues: 294 ml CH₄/g SV; Water hyacinth: 197 ml CH₄/g SV). From the results obtained, it became evident that, the anaerobic digestion of the waste separately can be more viable and efficient than the anaerobic co-digestion of the mixtures.

KEYWORDS:

ANAEROBIC CO-DIGESTION OF COOKED FOOD WASTE

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

INTRODUCCIÓN

Los efectos del desarrollo mundial han ocasionado el deterioro sobre los ecosistemas y la salud humana, debido a la contaminación que se origina por el uso de combustibles fósiles, la sobrepoblación y todo lo que esta conlleva como es el caso de la generación de desechos líquidos y sólidos. Esta situación ha llevado a la búsqueda de alternativas que mejoren las condiciones de las personas y contribuyan al desarrollo sostenible del planeta.

En el planeta hay 2.000 millones de personas con acceso a sistemas de gestión de residuos sólidos y 3.000 millones sin acceso a instalaciones de eliminación adecuadas de residuos. Para el Estado, los desechos municipales son motivo de preocupación pues en su mayoría la disposición no es la adecuada y genera una serie de problemáticas que afecta el medio ambiente(Naciones Unidas, 2017). Entre los desechos generados se encuentran los residuos de alimentos cocidos, los cuales representan un tercio de los alimentos producidos a nivel mundial de acuerdo con la FAO.

En Colombia la pérdida y desperdicio de comida al año es de aproximadamente el 34% de los alimentos, lo que equivale a 9.76 millones de toneladas anuales, siendo 22% el que se pierde y 12% el que se desperdicia(Marcela, Anaya, Cáterin, & Pechene, 2017), estos desechos hacen parte de los residuos sólidos orgánicos de los cuales a nivel nacional se aprovechan 97.905 toneladas al año.

Las instituciones universitarias generan una cantidad significativa de residuos sólidos que pueden ser aprovechados en materia de investigación y proponer alternativas sostenibles para su disposición. La Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga cuenta con aproximadamente 10.000 estudiantes sin contar personal administrativo, planta docente y personal de mantenimiento, y en su campus tiene 8 cafeterías donde en su totalidad sirven alimentos cocidos. Según un estudio elaborado en el año 2013 en el que se evaluó el manejo de residuos sólidos en la UPB-Seccional Bucaramanga, se encontró que los residuos que más se generaban en la institución eran de comida y jardinería con 149 kg/día(Castillo & Luzardo, 2013).

Los residuos de comida y jardinería tienen propiedades fisicoquímicas que permiten ser aprovechados por su potencial bioquímico de generación de metano (Solarte Toro et al, 2017) en

procesos de digestión y co-digestión anaerobia, los cuales funcionan como alternativas de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos y disminuye la cantidad de desechos que llegan a rellenos sanitarios.

En este proyecto de investigación se evaluará la capacidad de producción de metano por co-digestión anaerobia de desechos alimenticios cocidos generados en cafeterías de instituciones universitarias, junto con co-sustratos provenientes de diferentes actividades y procesos realizados en estas instituciones. El punto de partida del proyecto será el análisis de parámetros fisicoquímicos iniciales del inóculo, sustrato y co-sustratos para lo cual se utilizará los métodos estándares.

La influencia del co-sustrato y la proporción de este se determinará a partir del potencial bioquímico de metano (PBM) generado en la co-digestión anaerobia de desechos alimenticios cocidos, mediante el protocolo de Field.

1. OBJETIVOS

1.1. Objetivo general

Evaluar la capacidad de producción de metano a partir de la co-digestión anaerobia de desechos alimenticios cocidos generados en cafeterías de instituciones universitarias.

1.2. Objetivos específicos

Analizar los parámetros físico-químicos iniciales del inculo, sustrato y co-sustratos utilizados para la biodigestión anaerobia de desechos alimenticios cocidos.

Determinar la influencia del tipo de co-sustrato utilizado en la co-digestión anaerobia de desechos alimenticios cocidos sobre la producción de metano.

Evaluar la influencia de la proporción de los co-sustratos utilizados en la co-digestión anaerobia de desechos alimenticios sobre la producción de metano.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1. ANTECEDENTES

La digestión anaerobia es una tecnología que tiene alto potencial para el tratamiento de residuos orgánicos como es el caso de los desechos alimenticios cocidos. Además, tiene beneficios ambientales y económicos, entre ellos: fuente de energía renovable, reducción de residuos que llegan al relleno sanitario y ahorro de costos de energía para viviendas, empresas e instituciones (Guardia-Puebla et al, 2016). Esta tecnología con el paso de los años se ha convertido en una de las más atractivas y comunes, sin embargo, hay un límite con respecto a la investigación de co-digestión anaerobia de desechos alimenticios cocidos y su potencial de producción de metano.

Existen distintos tipos de desechos alimenticios, como frutas y vegetales, desechos domiciliarios y de restaurantes, los cuales varían según la ubicación geográfica, temporada, procesos de cocción y consumidores. Los desechos alimenticios cocidos se caracterizan por sus componentes complejos y alto contenido de materia orgánica. Los componentes de los desechos alimenticios consisten en proteínas, polímeros carbohidratados, lípidos y ácidos orgánicos. Distintas fuentes han indicado que los desechos alimenticios cocidos tienen pH aproximado de 5.0, relación de C/N de 18.5% y potencial de biometano de 460 NL CH₄/ kg de sólidos volátiles. (Kumar et al, 2019) Estas propiedades convierten a los desechos de comida en una alternativa que a través de la investigación se podría determinar su efectividad para generación de energía renovable.

La co-digestión anaerobia que se deriva de la digestión anaerobia, tiene como propósito proporcionarles a los microorganismos encargados de la formación de metano, el alimento y los nutrientes necesarios para aumentar el potencial de producción del biogás, mediante la mezcla de sustrato/co-sustrato e inóculo. El estudio de esta alternativa ha sido ampliamente evaluado con base en la influencia del tipo y proporción de los co-sustratos utilizados.

Solarte Toro et al. (2017), evaluaron el potencial de producción de metano a partir de la digestión y co-digestión anaerobia de residuos de comida y residuos de poda (sustratos) en bioreactores a escala de laboratorio, para ello caracterizaron sustratos e inóculo a partir de sólidos totales ST, sólidos volátiles SV, relación SV/ST, CHONS, relación C/N, lignina, celulosa, hemicelulosa,

densidad y humedad. Los residuos de comida mostraron mejor estabilidad que los residuos de poda respecto a la relación C/N, lo cual ocurre debido al contenido de proteína animal. La producción de biogás se calculó teórica y experimentalmente, el potencial teórico de biogás de mayor rendimiento fue el de residuos de comida, sin embargo, el potencial experimental de biogás de mayor rendimiento fue el de la co-digestión de ambos sustratos.

El creciente uso de estas tecnologías ha hecho necesaria la creación de metodologías para medir la eficiencia de estas con base en la producción de metano. El protocolo establecido por Angelidaki et al. (2009), en el que se define el procedimiento para determinar el potencial bioquímico de metano (PBM) de residuos orgánicos, ha sido ampliamente usado, no solo como parámetro de medición, sino también como parámetro de diseño y viabilidad económica de plantas de biogás. Al igual que el modelo Gompertz, el cual evalúa la influencia y la proporción del co-sustrato en la producción de metano (Parra Orobio, 2014).

En un estudio elaborado en India por V. B. Barua et al. (2018), se compara la co-digestión anaerobia de jacinto de agua y desechos alimenticios cocidos con y sin tratamiento, mediante el PBM y el Modelo Gompertz para el análisis de la producción de metano. Se establecieron dos grupos de mezclas, un grupo sin tratamiento y el otro con pretratamiento térmico. El grupo de mezclas que fueron pretratadas térmicamente mostraron mejor composición de biogás con un porcentaje de metano de aproximadamente 70% a diferencia del grupo no tratado. Además, la producción de biogás de las mezclas tratadas tuvo mejor rendimiento que las no tratadas.

Los parámetros fisicoquímicos tienen una gran influencia sobre la producción de biogás, como lo muestra Mu et al. (2019) en su investigación donde se evalúa la producción de metano a partir de la co-digestión anaerobia de desechos alimenticios cocidos, desechos de jardín y lodo anaerobio. Los días de mayor producción fueron aquellos en los que el pH se mantuvo cercano a 7.0, al momento de disminuir el pH hasta 5.0, la generación de biogás decrecía hasta el punto 0, al igual que los ácidos grasos volátiles que disminuían conforme se terminaba el ensayo y la relación C/N que es importante para determinar el radio de mezcla de sustrato/co-sustrato.

En la co-digestión anaerobia es fundamental la proporción de mezcla de sustrato y co-sustrato, ya que, influye directamente en la producción de metano. En un estudio realizado en la Universidad del Sur de Florida en Estados Unidos elaborado por Lee et al. (2019), en el que se evalúa el efecto del radio de mezcla de co-sustrato para determinar que la co-digestión anaerobia a partir de

desechos alimenticios y residuos de jardín produce metano lentamente en el comienzo del proceso, pero en largos periodos de tiempo la producción aumenta considerablemente y se estabiliza.

2.2. MARCO TEÓRICO

Los desechos sólidos orgánicos generalmente presentan gran contenido de materia orgánica, nutrientes y humedad por lo que representan una fuente de degradación del ecosistema cuando se disponen inadecuadamente. Sin embargo, estas características benefician la transformación a través de alternativas de aprovechamiento biológicas como la digestión anaerobia y sus derivados, en la que generan subproductos como el biogás rico en metano que es una fuente de energía renovable que funciona como suplente de los combustibles fósiles.

2.2.1. Residuos sólidos orgánicos (RSO)

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

Los residuos sólidos orgánicos hacen parte de los desechos aprovechables de origen orgánico en su mayoría biodegradables, como lo menciona (Parra Orobio, 2014), este factor es fundamental para escoger la tecnología a usar en su aprovechamiento o disposición. Su degradación rápida y de manera natural depende de los componentes fisicoquímicos del residuo, como los sólidos volátiles que determinan la materia orgánica presente en el mismo.

Entre los residuos sólidos orgánicos encontramos, desperdicios de alimentos, verduras, frutas, carne, huevos, etcétera. A pesar de que el plástico tiene como origen un compuesto orgánico, no se clasifica como residuo orgánico (Jaramillo Henao & Zapata Márquez, 2008).

2.2.1.1. Clasificación de los RSO

Según fuente de generación:

- ✓ **RSO institucionales:** Estos desechos provienen instituciones públicas y privadas. Su contenido principalmente se compone de cartones, papeles y también residuos alimenticios que provienen de los comedores institucionales.
- ✓ RSO provenientes del mantenimiento de calles, residuos de mercados, residuos domiciliarios y comercial.

Según su naturaleza o característica física:

- ✓ Desechos alimenticios
- ✓ Heces animales
- ✓ Residuos de verduras
- ✓ Cartón y papel
- ✓ Cuero
- ✓ Plásticos

2.2.1.2. Propiedades biológicas de los RSO

Los RSO se componen de ciertas características biológicas siendo una de las más importantes la fracción biológica de los mismos, pues mediante proceso biológicos como la actividad de los microorganismos se convierten en gases y otros productos aprovechables. A partir de la putrefacción de estos residuos por su contenido de materiales orgánicos se da la generación de olores y propagación de enfermedades por medio de vectores.

2.2.1.3. Aprovechamiento de los RSO

Actualmente existen diferentes alternativas de aprovechamiento de RSO que mediante procesos físicos y químicos puedan ser transformados en un producto el cual se pueda reincorporar al ciclo económico. El aprovechamiento de un residuo es viable cuando presenta una economía sostenible, factible técnicamente y respeta el ambiente.

La Política para la Gestión de Residuos dice que, el aprovechamiento es el conjunto de fases continuas de un proceso, cuando la materia prima inicial es un residuo, donde se entiende que el tratamiento tiene el objetivo económico de valorizar el residuo y obtener un producto o subproducto utilizable (Jaramillo Henao & Zapata Márquez, 2008).

Para el aprovechamiento de los RSO se deben tener en cuenta los siguientes criterios:

- ✓ Materia prima con valor comercial, sujeta a las leyes del mercado y consideradas como insumo.
- ✓ Se puede realizar aprovechamiento cuando se emplea directamente o como resultado de procesos de tratamiento o reutilización.
- ✓ Las autoridades ambientales y municipales son encargadas de decidir si un desecho es aprovechable y establecerlo en sus respectivos PGIRS cuando deban formularlos.

2.2.1.4. Tipos de tratamientos para el aprovechamiento de los RSO

- ✓ **Alimentación animal:** Los residuos sólidos orgánicos presentan algunas características que pueden llegar a dificultar su manejo y almacenamiento, siendo una de ellas el alto contenido de humedad. Por esta razón, su procesamiento debe ser rápido para disminuir los problemas de putrefacción. En la incorporación de producto resultante orgánico como aditivo fundamental en la alimentación animal es necesaria la adecuada planificación para la que se debe tener en cuenta: disponibilidad de productos, cantidades, procesos de preparación del alimento según fuente y destino, y periodos de tiempo.
- ✓ **Compostaje:** En el compostaje ocurre transformación biológica de los RSO e intervienen gran cantidad de microorganismos aerobios que necesitan de un medio que les brinde la humedad necesaria y sustratos orgánicos heterogéneos en estado sólido. En este proceso ocurre el paso por una etapa termófila que, como producto de los procesos de degradación de dióxido de carbono, agua y minerales, materia orgánica estable y libre de patógenos. El resultante de este tratamiento puede ser utilizado en la agricultura y así contribuir al proceso de aprovechamiento de residuos y a su vez la reducción del consumo de abonos químicos.
- ✓ **Lombricultivo:** Es una alternativa de tratamiento que utiliza lombrices las cuales son introducidas en un medio acondicionado para su acelerado y masivo crecimiento en espacios que usualmente son reducidos. La alimentación cumple un rol fundamental para su adecuada reproducción y crecimiento, por lo que se utilizan materiales biodegradables

obteniendo la transformación de los residuos en biomasa y humus (abono orgánico) de muy buena calidad.

Según Ramírez Joyo (2017) es una biotecnología que utiliza una especie de lombriz domesticada como agentes biológicos en la transformación y de reciclaje de todo tipo de materia orgánica biodegradable con fines prácticos.

- ✓ **Biocombustibles:** Es un combustible proveniente de residuos orgánicos de origen animal o vegetal. Según una investigación realizada por Stratta. (2000), afirman que el cambio de los combustibles fósiles tradicionales que se obtienen a partir del petróleo, por otros de origen vegetal, cobran gran importancia por diversas razones, una de las principales y más importantes es la lucha contra el deterioro medioambiental, además del desarrollo de la agricultura e industrias que se relacionan con esta actividad.

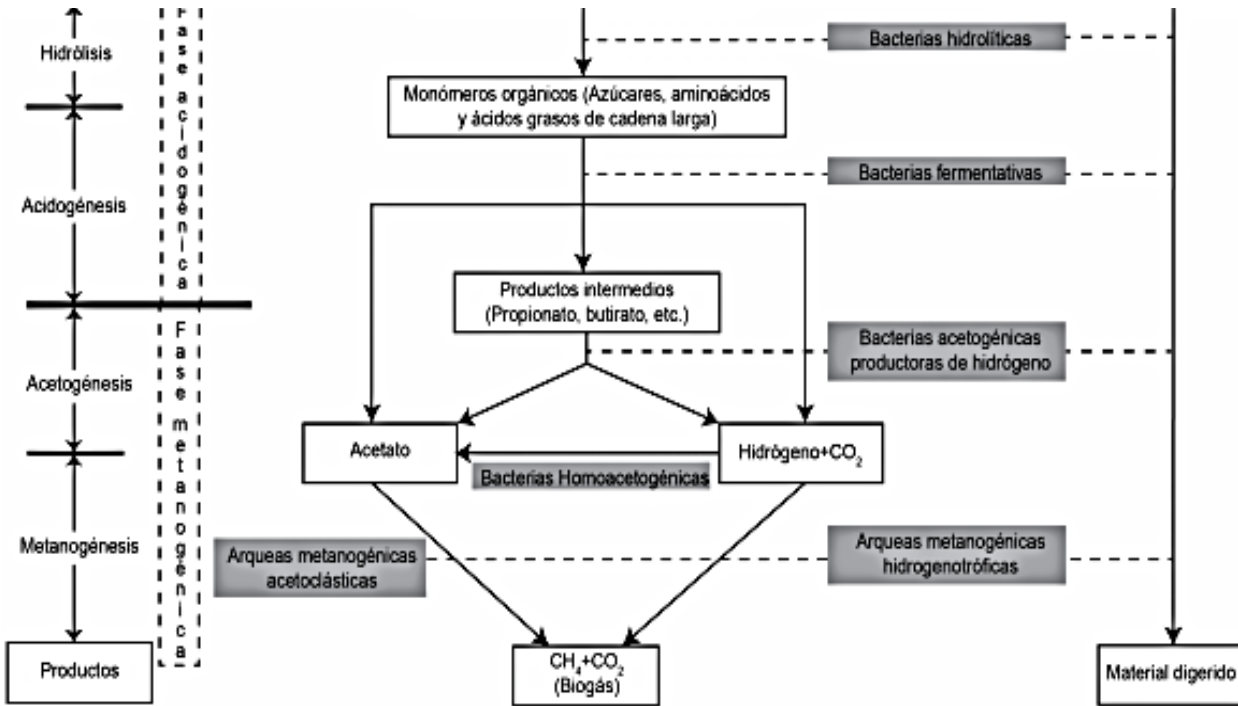
2.2.2. Digestión Anaerobia

La digestión anaerobia es un proceso en ausencia de oxígeno mediante el cual los microorganismos degradan la materia orgánica, dicho proceso da lugar a una mezcla que está compuesta principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) conocida como biogás.

Durante la digestión anaerobia se da un proceso de transformación del material biodegradable disponible, dicho proceso a su vez libera energía almacenada. Más del 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano, consumiéndose sólo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano comparado con el 50% consumido en un sistema aerobio (Campos Pozuelo, 2001).

El proceso de digestión anaerobia generalmente considera tres etapas para la degradación de residuos sólidos o lodos, hidrólisis, acidogénesis, metanogénesis y dos para residuos líquidos, acidogénesis y metanogénesis. La figura 1 muestra de manera resumida los procesos que se llevan a cabo en la digestión anaerobia.

Figura 1. Secuencia metabólica y grupos microbianos que intervienen en la DA.



Fuente: Tomado de (Cárdena-Cleves, Parra-Orobio, Torres-Lozada, & Vásquez-Franco, 2016)

2.2.2.1. Hidrolisis

La hidrólisis es la primera etapa de la digestión anaerobia, donde se hidrolizan los diferentes compuestos involucrados en el proceso, unos más rápido que otros según su estructura. Se da lugar en el exterior de las bacterias, por la acción de las exo-enzimas de bacterias anaerobias o facultativas, conocidas como acidogénicas o fermentativas (Angulo Mosquera & Loaiza Gualtero, 2016). Es de gran importancia la presencia de estas bacterias, ya que además de suministrar sustrato para los grupos microbianos posteriores, reducen el oxígeno disuelto y gaseoso que por razones externas se pudiera estar acumulando en el medio.

Esta etapa puede ser la limitante de la velocidad del proceso global, sobre todo tratando residuos con alto contenido en sólidos. Incluso en casos donde las fases acidogénicas o metanogénicas son consideradas como pasos limitantes, la hidrólisis puede afectar todo el proceso (Campos Pozuelo, 2001).

Los factores de los cuales depende el proceso son, la temperatura, el Tiempo de Retención Hidráulico (TRH), composición de los sustratos, tamaño de partícula, pH y la concentración de los

productos de la hidrólisis (azúcares simples, aminoácidos y AGV's) (Angulo Mosquera & Loaiza Gualtero, 2016).

2.2.2.2. Acidogénesis o fermentación

La acidogénesis es la etapa de la transformación de los monómeros obtenidos durante la hidrólisis, estos son degradados por una gran variedad de bacterias que reciben el nombre de fermentativas o acidogénicas, las cuales igualmente que en la fase hidrolítica son anaerobias y facultativas. Estas bacterias son las encargadas de producir dióxido de carbono, hidrógeno, alcoholes, ácidos orgánicos y algunos compuestos nitrogenados y sulfurados. Esta etapa a pesar de que no es límite del proceso global, igualmente cobra importancia ya que es donde se genera el ácido orgánico más importante, el ácido acético que es clave para la producción de metano, el cual es el sustrato principal para las bacterias metanogénicas (Parra Orobio, 2014).

2.2.2.3. Acetogénesis

La acetogénesis es llamada la acidogénesis intermedia ya que en esta etapa del proceso las bacterias acetogénicas eliminan sus propios desechos previamente metabolizados y que son provenientes del alimento de la biomasa. El proceso genera productos como ácidos grasos sencillos, que utilizan las bacterias como sustrato para su posterior actividad metanogénica (Mosquera Calle & Martínez Martínez, 2012). Alrededor del 70% del metano procede del acetato producido (Parra Orobio, 2014).

2.2.2.4. Metanogénesis

La metanogénesis es la última etapa del proceso y es donde se produce el metano que procede de la acción de las bacterias metanogénicas acetoclásticas e hidrogenofílicas, estas bacterias son las encargadas de degradar el acetato y el hidrogeno, productos de la etapa anterior (Mosquera Calle & Martínez Martínez, 2012).

Luego, se genera un proceso de descarboxilación que es generado por las bacterias metanogénicas acetoclásticas. afirman que del acetato producido en la etapa anterior se obtiene el 70% del metano y el 30% restante proviene de la reducción del CO₂ realizada por el hidrogeno que da paso a la metanogenesis hidrogenotrofica.

Las bacterias metanogénicas suelen ser consideradas de gran importancia dentro de la agrupación de microorganismos anaerobios, siendo los responsables de la formación de metano y de la eliminación del medio de productos procedentes de etapas anteriores, además, son los que dan paso al proceso general de biometanización (Campos Pozuelo, 2001).

Dentro de la clasificación morfológica de los microorganismos metanogénicos se encuentran, bacilos cortos y largos, cocos de varias ordenaciones celulares, células en forma de placas y metanógenos filamentosos, existiendo tanto Gram positivos como Gram negativos, todos ellos del dominio *Archae*. A su vez, cada bacteria metanogénica posee cierto grupo de co-enzimas, siendo la co-enzima denominada M, paso importante para la formación final del metano (Campos Pozuelo, 2001).

2.2.3. Factores que influyen en la digestión anaerobia

Durante la digestión anaerobia existen factores que son de vital importancia para el adecuado desarrollo del proceso. Algunos de los más importantes son: Temperatura, pH, alcalinidad, humedad, relación sustrato/inoculo, agitación, inóculos, nutrientes, relación Carbono/Nitrógeno y AGV's.

2.2.3.1. Temperatura

La temperatura es un factor de gran importancia para el buen funcionamiento y desarrollo de los microorganismos en el medio anaerobio, principalmente afecta el crecimiento, que a su vez está directamente relacionado con la velocidad del proceso. Al aumentar la temperatura, aumenta la tasa de crecimiento microbiano y a temperaturas bajas implicaría tiempos de retención más largos (Angulo Mosquera & Loaiza Gualtero, 2016).

Para el tratamiento de los residuos mediante procesos anaerobios se evalúan los rangos con los que normalmente el proceso trabaja de manera óptima, generalmente son dos, el primero con temperaturas de 25 - 40°C (rango mesofílico) y el segundo 44 - 57°C (rango termofílico) (Angelidaki et al., 2009). Las temperaturas que se consideran óptimas para cada uno de los rangos son 35 y 55°C, respectivamente; debido a su diferencia estructural. Un cambio de rangos mesofílico a termofílico puede desencadenar una fuerte disminución de la producción de biogás hasta que las poblaciones microbianas se recuperen (Parra Orobio, 2014).

2.2.3.2. pH

El pH es una variable indicadora de sistemas anaerobios, de esta dependen diferentes tipos de fenómenos que tienen gran influencia en el proceso, unos de los más usuales son las sobrecargas orgánicas, o la presencia de un inhibidor de la etapa metanogénica, dichos fenómenos generan desequilibrios entre la producción y el consumo de ácidos grasos volátiles, que desencadenan la acumulación de estos y por tal motivo el descenso del pH, lo cual provoca la acidificación del medio (Campos Pozuelo, 2001). El funcionamiento y crecimiento de los diferentes grupos de microorganismos que tienen acción en la digestión anaerobia y presentan un pH óptimo, es preferible acondicionarles un medio neutro de 7,0 unidades ya que, pueden ser inhibidos en un ambiente ácido. Se puede exceptuar los microorganismos acidogénicos ya que suelen ser más tolerantes llegando a aceptar pH de 6,0 unidades, y la etapa de hidrólisis tiene un rango óptimo de pH entre 5,5 - 6,5 unidades (Angulo Mosquera & Loaiza Gualtero, 2016).

2.2.3.3. Alcalinidad

La alcalinidad es la capacidad buffer del agua y uno de los factores dependientes del adecuado desempeño de la digestión anaerobia, esta medida neutraliza ácidos del medio anaerobio. En un rango de pH de 6 a 8 el equilibrio químico que estabiliza la alcalinidad es el dióxido de carbono-bicarbonato (Campos Pozuelo, 2001). La formación de AGV's genera una disminución del pH, pero en el medio se dan diferentes reacciones y es la reacción CO_2 a HCO_3 , la encargada de recuperar la neutralidad (Angulo Mosquera & Loaiza Gualtero, 2016).

Algunos índices que comúnmente son utilizados para el control de la capacidad tamponadora son α y AI / AP. Para el índice α se recomiendan valores superiores a 0.5 y estables de 0,7, corresponden a la relación entre la alcalinidad bicarbonatada y la alcalinidad total. El índice AI / AP pertenece a la relación entre la alcalinidad que otorgan los AGV y la alcalinidad bicarbonatada; los valores de este índice superiores a 0.30 indican disturbios en el proceso (Pérez & Torres, 2008). Durante el desarrollo normal del proceso de digestión anaeróbica la alcalinidad debe permanecer en un rango cercano a 2000 mg CaCO_3/L .

2.2.3.4. Humedad

En la digestión anaerobia existen sistemas húmedos y secos que dependen de la cantidad de sólidos totales del sustrato utilizado en el proceso, este parámetro es de vital importancia ya que permite caracterizar el sustrato e inóculo que se vayan a emplear durante la actividad. Mediante investigaciones realizadas se ha logrado establecer que los sistemas secos pueden producir biogás en gran cantidad como los sistemas húmedos. Cuando el contenido de ST es inferior al 15% la digestión anaerobia es húmeda y entre el 20 y el 40% de ST, se denomina seca (Parra Orobio, 2014).

2.2.3.5. Relación Sustrato/Inóculo

Esta relación es un factor clave en la optimización del proceso al igual que la presencia de los nutrientes. Estos parámetros tienen influencia directa en el proceso de digestión anaerobia, más comúnmente en la hidrólisis. Según Angulo Mosquera et al. (2016), es considerada una de las limitantes del proceso.

La relación S/I influye directamente en la velocidad de biodegradación del sustrato y permite un crecimiento equilibrado de la población microbiana; igualmente la presencia de nutrientes como Nitrógeno y Fósforo, son fundamentales para que los microorganismos puedan obtener la energía necesaria para sintetizar las reacciones bioquímicas en la oxidación de los sustratos orgánicos.

Los términos con los cuales se suele expresar la relación sustrato/inóculo (S/I) es en SV ($\text{gSV}_{\text{sustrato}}/\text{gSV}_{\text{inóculo}}$) y en ocasiones de DQO ($\text{gDQO}_{\text{sustrato}}/\text{gSV}_{\text{inóculo}}$). La relación depende del tipo de sustrato e inóculo y se deben caracterizar para cada caso (Cárdena-Cleves et al., 2016). Esta relación tiene un papel importante en la hidrólisis de la DA, debido que se evidenció que a menores relaciones, la hidrólisis del sustrato avanza positivamente, reduciéndose el tiempo para la generación de metano (Angulo Mosquera & Loaiza Gualtero, 2016).

2.2.3.6. Agitación

La agitación garantiza que haya el contacto de biomasa y sustrato necesarios para la degradación, además, le brinda homogeneidad al medio, entre otros factores importantes. De acuerdo con Parra Orobio (2014) es recomendable hacerlo manualmente de tipo orbital o intermitente ya que evita la ruptura de flocs microbianos y ayuda a incrementar la actividad enzimática.

De acuerdo con Campos Pozuelo (2001) la agitación de los reactores anaerobios tiene diversos objetivos:

- ✓ El contacto del sustrato fresco con la población microbiana.
- ✓ Eliminar los metabolitos producidos por los metanogénicos, ya que, podría favorecer la salida de los gases.
- ✓ Brindar homogeneidad y una densidad uniforme a la población microbiana.
- ✓ Evitar la formación de capa superficial y de espumas, así como la sedimentación en el reactor.
- ✓ Evitar la formación de espacios muertos del sistema que reducirían el volumen efectivo del reactor, y afectación a la hidráulica del sistema
- ✓ Mantenimiento de una temperatura constante y eliminación de la estratificación térmica en todo el reactor

2.2.3.7. Inóculos

El inóculo en la digestión anaerobia hace parte del inicio de la actividad y se convierte en el eje principal del proceso, garantiza una óptima actividad microbiana y a su vez una mayor producción de metano. La adecuada selección de este es esencial para el arranque de los reactores. Además, debe contener microorganismos activos capaces de degradar los compuestos orgánicos del residuo (Angulo Mosquera & Loaiza Gualtero, 2016).

Los parámetros fisicoquímicos permiten calcular el contenido de biomasa activa (SV/ST) y su capacidad para producir metano. Por esta razón, se realiza la actividad metanogénica específica (AME) para lo cual se utiliza una mezcla de AGV's que usualmente se componen de acetato, propionato y butirato, en proporciones específicas (Cárdena-Cleves et al., 2016).

2.2.3.8. Nutrientes

Los nutrientes son componentes esenciales en un sistema anaerobio, se destaca su presencia en sustratos orgánicos que se biodegradan para cubrir los requerimientos de las diferentes poblaciones microbianas que trabajan en cada etapa del proceso. Los principales son carbono, nitrógeno, azufre, fósforo, hierro, cobalto, níquel, molibdeno, selenio, entre otros (Parra Orobio, 2014).

2.2.3.9. Ácidos Grasos Volátiles (AGV'S)

Los AGV's son los intermediarios en las principales reacciones ocurridas en la DA, por tal motivo, son uno de los parámetros que pueden indicar la evolución del proceso efectivamente. Esto debido a que, un aumento en la concentración de ácidos volátiles en el sistema significa una desestabilización del proceso y, en consecuencia, una disminución de la producción de biogás (Angulo Mosquera & Loaiza Gualtero, 2016). El aumento de su presión está relacionado con una desestabilización del proceso, por lo tanto, una disminución en la producción de biogás. Es importante conocer del proceso y evolución de estos, porque de ellos depende su monitorización y respectivo control de reactores (Campos Pozuelo, 2001).

2.2.3.10. Relación C/N

La relación carbono/nitrógeno es fundamental para todo proceso de digestión anaerobia ya que son parte de los nutrientes necesarios para el desarrollo del medio donde los microorganismos procesan la biomasa y se da la producción de energía. Para lograr el máximo rendimiento en la degradación del sustrato, se debe determinar la relación C/N óptima, pues varía dependiente de los nutrientes presente en el medio y la naturaleza del sustrato e inóculo agregados (Cáceres Cáceres & Rincón Perez, 2018).

2.2.4 Co-digestión Anaerobia

La co-digestión anaerobia es una variante de la digestión anaerobia, la cual consiste en mezclar dos o más sustratos con características complementarias para el tratamiento combinado, es conocida como una solución viable para superar las inhibiciones y mejorar el rendimiento del proceso debido de a una mejor disponibilidad de carbono, equilibrio de nutriente y capacidad de amortiguación (Bharati Barua et al., 2018). La principal ventaja de la co-digestión está en aprovechar la sinergia de las mezclas, y compensar carencias de cada uno de los sustratos por separado (Campos Pozuelo, 2001).

2.1.5. Actividad Metanogénica Específica (AME)

La AME se define como la capacidad máxima de producción de metano por un consorcio de microorganismos anaerobios, realizada en condiciones controladas de laboratorio para viabilizar

la actividad bioquímica máxima de conversión de sustratos orgánicos a biogás. Puede ser utilizada como parámetro de monitoreo de la eficiencia de la población metanogénica presente en un reactor biológico y es una herramienta importante para el control operacional de reactores anaerobios (APHA, 1999). Se expresa en mg DQO/g SSV. d, o ml CH₄/g SSV.d.

Los parámetros de operación para el montaje del sistema son, concentración inicial del sustrato, el sustrato utilizado en la AME es una mezcla de ácidos grasos volátiles (ácido acético, propiónico y butílico). La concentración final se encuentra entre 0.2 y 0.5 g/L respectivamente. Cantidad de inóculo, la concentración mínima de inóculo debe ser de 0.8 g de SSV/l. Periodo de medición y nutrientes.

2.1.6. Potencial Bioquímico de Metano (PBM)

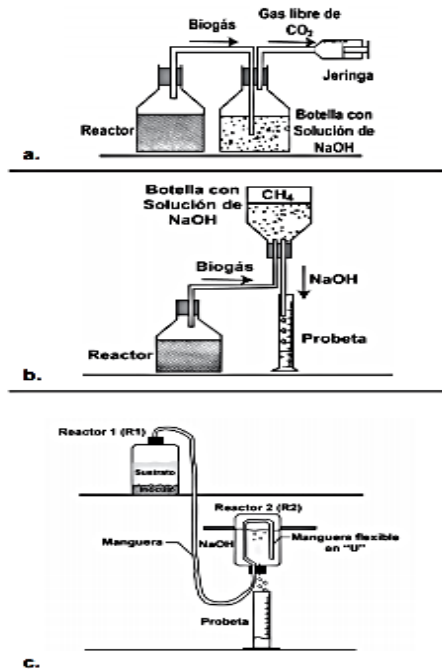
El PBM permite cuantificar la producción de biogás y establecer el grado de biodegradabilidad final, el rendimiento de la conversión de metano de sustratos orgánicos y posibles efectos inhibitorios en la digestión anaerobia del sustrato (Angelidaki et al., 2009).

Los métodos para la medición de biogás a través de ensayos de PBM se pueden dividir en 3 grupos: volumétricos, manométricos y por cromatografía de gases. En el volumétrico, se mide el aumento de volumen a presión constante, en el manométrico, se mide la variación de la presión a volumen constante y en la cromatografía de gases, se mide la concentración de metano en la muestra (Parra Orobio, 2014).

La medición de los métodos se describe a continuación:

Método Volumétrico: El método volumétrico se fundamenta en la medición del volumen de biogás producido por medio de reactor al cual se le agrega un inóculo (lodo) para posteriormente ser sometido a un ensayo de PBM, la solución de nutrientes y el sustrato, pasan a través de un medio que contiene una solución neutra que captura el CO₂.

Figura 2. Método volumétrico para la determinación del PBM



Fuente: Adaptado de (Cárdena-Cleves et al., 2016)

Método por Cromatografía de Gases: Es un método mediante el cual se realiza la medición del metano y gas carbónico que pueda estar presente en el volumen del biogás atrapado en el espacio superior libre de los reactores para ensayo de PBM. El método es utilizado en un reactor tipo batch, en donde el biogás acumulado en el espacio superior libre del reactor se extrae mediante una jeringa para cuantificar los gases independientes de la presión dentro del reactor.

Ventajas

- ✓ facilidad y economía
- ✓ Medición continua del contenido de metano en el biogás utilizando una solución alcalina (neutra) que captura el CO₂.
- ✓ Implementación de bajo costo, puede ser realizada en cualquier laboratorio.
- ✓ No requiere tiempos prolongados de actividad, ni mantenimiento

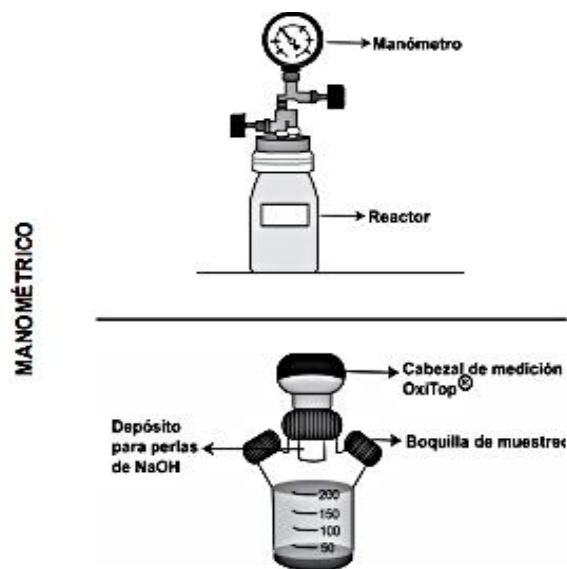
Limitaciones

- ✓ Microfugas en los equipos pueden aumentar la pérdida del metano.
- ✓ Medición constante del volumen desplazado (al menos 3 veces al día) y agitación de los reactores para mejorar la homogeneidad del medio y favorecer evacuación del biogás.
- ✓ control continuo del pH de la solución alcalina desplazante.

Método Manométrico: En este método el biogás producido está atrapado en el interior del reactor y se automáticamente se ejerce una presión interna que se mide por medio de sensores de presión o membranas transmisoras de presión que están conectadas en el reactor. El sistema Oxitop®, es el método que se utiliza con más frecuencia para este tipo de actividades, se compone de cabezales que contienen sensores de presión, además se le agregan perlas de NaOH las cuales capturan el CO₂. Es uno de los dispositivos más utilizados en este método, los sensores permiten tomar las presiones por medio de un sistema infrarojo, y cada sistema permite realizar extracción de gas.

Se realiza en reactores tipo batch, para medir el volumen de metano producido a partir de cierta cantidad de sustrato y condiciones experimentales definidas. Se expresa en ml de CH₄/g SV_{sustrato}, también se expresa en cantidad de sustrato L CH₄/kg sustrato, el volumen de sustrato L CH₄/L sustrato o la DQO adicionada L CH₄/kg DQO (Cáceres Cáceres & Rincón Perez, 2018).

Figura 3. Método manométrico para la determinación del PBM



Fuente: Adaptado de (Cárdena-Cleves et al., 2016)

Ventajas

- ✓ menor error por manipulación humana.
- ✓ Fácil toma de registro de presión, no requiere de control estricto.
- ✓ Equipo automatizado para toma y obtención de datos.

Limitaciones

- ✓ Medidas indirectas por lo tanto se deben realizar cálculos.
- ✓ Las botellas tienen límite de presión para su funcionamiento.
- ✓ Más costoso y requiere de mantenimiento técnico.

2.1.7. Modelo Gompertz

El modelo Gompertz presenta regresión no lineal que permite deducir el comportamiento de las fases de la digestión anaerobia. También, permite identificar parámetros como la tasa máxima de producción de CH₄, la producción máxima de CH₄ y la fase de letargo, la cual hace énfasis en el tiempo que ocurre la transformación del sustrato y su relación con la fase producción del biogás mediante la ecuación 1 (Parra Orobio, 2014).

$$V_{CH_4} = P_{m\acute{a}x} * exp \left\{ - exp \left[\frac{R_{m\acute{a}x} * exp(1)}{P_{m\acute{a}x}} (\lambda - t) + 1 \right] \right\} \quad Ec. 1$$

V_{CH_4} = Producción acumulada de metano (L*d⁻¹)

$P_{m\acute{a}x}$ = Máxima producción acumulativa de metano al culminar el experimento (L)

$R_{m\acute{a}x}$ = Máxima velocidad de producción metano (L*d⁻¹)

λ = Fase de letargo (d)

t = Tiempo de generación de metano (d)

3. METODOLOGÍA

La realización de este proyecto se llevó a cabo en el laboratorio de aguas residuales de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga. Inicialmente, se realizó la caracterización fisicoquímica de sustrato, co-sustrato e inóculo, este último fue sometido a la prueba de actividad metanogénica específica (AME) durante 30 días. Simultáneamente, se ejecutó el ensayo para determinar el potencial bioquímico de metano (PBM) con el fin de establecer la capacidad de producción de metano de las mezclas de sustrato (desechos alimenticios cocidos) y co-sustratos (jacinto de agua y residuos de poda).

3.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA INICIALES DEL INÓCULO, SUSTRATO Y CO-SUSTRATOS UTILIZADOS PARA LA CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE DESECHOS ALIMENTICIOS COCIDOS.

3.1.1. Inóculo

El inóculo utilizado fue obtenido a partir de una muestra de lodos anaerobios del reactor UASB de la PTAR de Bavaria S.A. Los parámetros determinados se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos analizadas para inóculo.

PARÁMETRO	MÉTODO
pH	4500-H ⁺
Sólidos Totales (ST)	2540B
Sólidos Volátiles (SV)	2540E
Ácidos Grasos Volátiles (AGV)	5560C
Actividad Metanogénica Específica (AME)	Protocolo propuesto por Field (1987)

Fuente: Autores

El análisis de los parámetros fisicoquímicos se realizó de acuerdo a los métodos estándar (APHA, 1999).

3.1.1.1. Actividad Metanogénica Específica (AME)

La producción de metano se calculó mediante el método manométrico y siguiendo el protocolo propuesto por Field (1987).

Método manométrico

El método manométrico se basa en la medición del metano producido a partir de la diferencia de presión. Para este proyecto se usó el Sistema OxiTop para medición de AME. Los frascos del sistema OxiTop están compuestos por cabezal de medición de OxiTop, capsula para las perlas de NaOH, recipiente de 250 ml y volumen útil de 200 ml (figura 4).

Figura 4. Botella experimental para prueba de PBM



Fuente: Autores.

El ensayo de la actividad metanogénica específica (AME) se realizó por duplicado en botellas de 250 ml, a las cuales se le agregó 100 ml de agua destilada, 6 ml de AGV de 3.8 g DQO/l, 0.4 ml de macronutrientes y micronutrientes, 0.04 g de levadura, 5 ml de lodo anaerobio de 1,5 g SV/l, se llevó al volumen efectivo de 200 ml, se ajustó pH, en el cabezal del equipo se introdujeron 4 perlas de NaOH con el fin de purificar el biogás producido y se burbujeó con nitrógeno durante 3 minutos para eliminar el oxígeno residual que pudiera quedar dentro de la botella (Field, 1987). Las botellas fueron selladas y tapadas para asegurar el medio anaerobio. Por último, se llevaron a la Incubadora-OxiTop N00011843 a 37°C por un periodo de 30 días con monitoreo diario cada 6 horas y agitación manual. Los cálculos para obtener los valores de AME se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Cálculos para determinar AME.

Ecuación	Parámetro	Resultado
$V_{CH_4CE} = \frac{Vl * P * T_{CE}}{P_{CE} * T_e}$	<p>V_{CH₄CE}: Volumen de CH₄ a condiciones estándar (L)</p> <p>V_l: Volumen libre del reactor (L)</p> <p>P: Presión registrada en el equipo OxiTop (atm)</p> <p>T_{ce}: Temperatura a condiciones estándar (K)</p>	<p>Volumen producido de CH₄ a condiciones estándar</p>

	<p>Pce: Presión a condiciones estándar (hPa)</p> <p>Te: Temperatura del experimento</p>	
$AME = \frac{P}{FC * V * SVT}$	<p>AME: Actividad Metanogénica Específica (gDQO/gSV*d)</p> <p>P: Pendiente</p> <p>FC: Factor de conversión a DQO (ml CH₄/gDQO)</p> <p>V: Volumen efectivo líquido del digestor(l)</p> <p>SVT: Sólidos volátiles totales (g/l).</p>	

Fuente: Adaptado de (Cáceres Cáceres & Rincón Perez, 2018)

3.1.2. Sustrato y co-sustratos

En este proyecto se usaron desechos alimenticios cocidos como sustrato, y residuos de poda y jacintos de agua de la institución como co-sustratos.

Los parámetros físico-químicos que se determinaron se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Parámetros fisicoquímicos analizados para sustrato y co-sustratos.

PARÁMETRO	MÉTODO
pH	4500-H ⁺
Humedad	
Sólidos Totales (ST)	2540B
Sólidos Volátiles (SV)	2540E
Ácidos Grasos Volátiles (AGV)	5560C
Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)	5210

Demanda Química de Oxígeno (DQO)	5220
Nitrógeno Total	4500-N
Nitrógeno Amoniacal	4500-NH3
Fosforo Total	4500-P

Fuente: Autores

El análisis se realizó de acuerdo a los métodos estándar (APHA, 1999).

3.1.3. Caracterización fisicoquímica de la mezcla sustrato/co-sustrato

La caracterización fisicoquímica se realizó de acuerdo a los métodos estándar (APHA, 1999) y de allí se obtuvo la relación C/N y STV para determinar el PBM según lo establecido por Parra Orobio (2014).

Tabla 4. Parámetros fisicoquímicos analizados para las mezclas.

PARÁMETRO	MÉTODO
pH	4500-H ⁺
Sólidos Totales (ST)	2540B
Sólidos Volátiles (SV)	2540E
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	5220
Nitrógeno Total	4500-N

Fuente: Autores

3.2. DISEÑO EXPERIMENTAL PARA EVALUACIÓN DEL TIPO Y PROPORCIÓN DEL CO-SUSTRATO EN LA PRODUCCIÓN DE METANO A PARTIR DE LA CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE DESECHOS ALIMENTICIOS COCIDOS

3.2.1. Diseño estadístico

Para evaluar la influencia del tipo y la proporción de co-sustrato en la producción de metano se utilizó el diseño factorial 2², en donde se consideraron 2 factores y 2 niveles de cada factor (Ferré & Rius, n.d.), los factores fueron, tipo de co-sustrato y proporción de co-sustrato y los niveles fueron, proporción 1 y proporción 2.

La proporción del co-sustrato en la mezcla se determinó a partir de los datos obtenidos en la caracterización fisicoquímica del sustrato y co-sustratos. Los datos usados para esto fueron de las pruebas de DQO y nitrógeno total y así se obtuvo la relación C/N de cada uno.

Las proporciones escogidas fueron

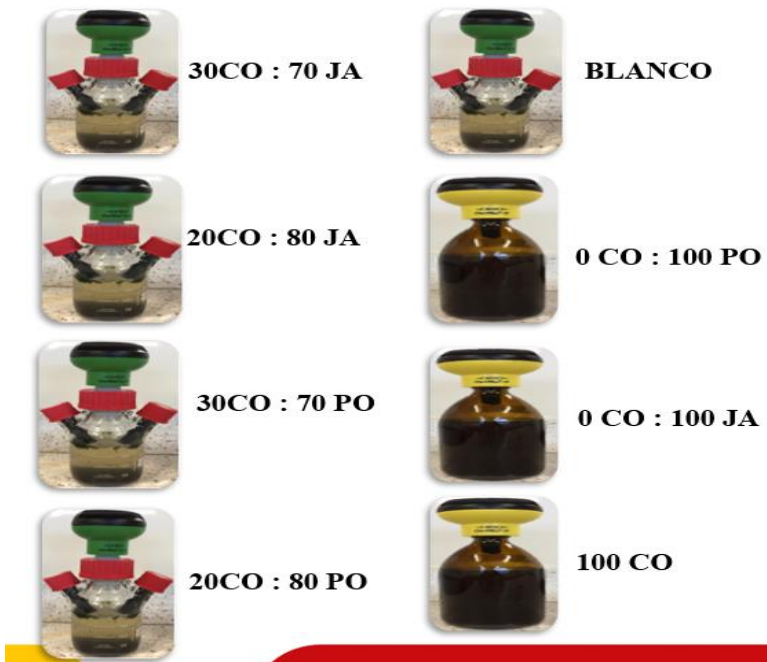
Tabla 5. Diseño experimental.

TIPO PROPORCIÓN	JACINTO DE AGUA	RESIDUOS DE PODA
30:70	30CO:70JA	30CO:70PO
20:80	20CO:80JA	20CO:80PO

CO: Desechos Alimenticios Cocidos, **JA:** Jacinto de Agua, **PO:** Residuos de Poda **Fuente:** Autores

A continuación, se muestra el diagrama del montaje experimental realizado a partir del diseño factorial establecido.

Montaje experimental para la prueba de PBM según las proporciones



Fuente: Autores.

3.2.2. Potencial Bioquímico de Metano (PBM)

La determinación de PBM se hizo mediante el método manométrico utilizando el sistema OxiTop. El sistema se compone de cinco botellas de vidrio de 250 ml y volumen efectivo de 200 ml con sus respectivos cabezales medidores de presión en hPa, capsula para depositar las perlas de NaOH y las salidas laterales para liberar biogás cuando sea necesario (figura 5). Se hicieron cuatro unidades experimentales correspondientes a cada mezcla y un control (inoculo y agua destilada). Adicionalmente, los blancos de cada sustrato (jacinto, poda y desechos cocidos) se hicieron en 3 botellas ambar de 500 ml y volumen efectivo de 400 ml (figura 5).

Figura 5. Botellas experimentales para prueba de PBM



Fuente: Autores.

Para la elaboración de la prueba para PBM se siguió la metodología planteada para AME, la diferencia fue que no se agregó la solución de ácidos grasos, sino que se añadió el sustrato y co-sustrato respectivos de cada botella. Las cantidades de sustrato y co-sustrato que se agregaron a cada botella fueron determinadas a partir de los sólidos volátiles totales de cada uno teniendo como base la relación sustrato/inoculo escogida, la cual fue de 0.3 g SV sustrato/g SV inoculo, según lo recomienda Parra-Orobio et al, (2015).

La tabla 6 muestra la masa en gramos añadida de sustrato y co-sustrato para cada mezcla y los controles.

Tabla 6. Mezclas experimentales para PBM.

MEZCLA	PESO SUSTRATO (g)	PESO CO-SUSTRATO (g)
30CO:70JA	0.0281	0.0805
20CO:80JA	0.0188	0.0922
30CO:70PO	0.0281	0.0709
20CO:80PO	0.0188	0.0812
BLANCOS		
BLANCO JACINTO	0.111	
BLANCO PODA	0.1	
BLANCO COCIDO	0.1	
CONTROL		
VOLUMEN INOCULO	5 ml	

CO: Desechos Alimenticios Cocidos, **JA:** Jacinto de Agua, **PO:** Residuos de Poda **Fuente:**

Autores

El análisis de la prueba se hizo a partir del cálculo de volumen de CH₄ a condiciones estándar y los sólidos totales volátiles de sustrato presente en la botella. Las ecuaciones usadas para determinar PBM se muestran en la tabla 7

Tabla 7. Cálculos para determinar PBM.

Ecuación	Parámetro	Resultado
$n_{CH_4} = \frac{P * V_l}{R * T_e}$	<p>n_{CH₄}: Moles de CH₄ (mol)</p> <p>P: Presión en el Oxitop (atm)</p> <p>VI: Volumen libre del reactor (L)</p> <p>R: Constante de gases ideales (atm*L*K⁻¹*mol⁻¹)</p> <p>Te: Temperatura del experimento (K)</p>	Moles producidas de metano

$V_{CH_4CE} = \frac{n_{CH_4} * R * T_{CE}}{P_{CE}}$	<p>V_{CH₄CE}:</p> Volumen de CH ₄ a condiciones estándar (L) <p>n_{CH₄}:</p> Moles de CH ₄ (mol) <p>R:</p> Constante de gases ideales (atm*L*K ⁻¹ *mol ⁻¹) <p>T_{ce}:</p> Temperatura a condiciones estándar (K) <p>P_{ce}:</p> Presión a condiciones estándar (hPa).	<p>Volumen producido de CH₄ a condiciones estándar</p>
$PBM = \frac{V_{CH_4}}{gSTV}$	<p>PBM:</p> Potencial bioquímico de metano (ml CH ₄ /g STV) <p>SVT:</p> Cantidad de sustrato presente en el reactor (g)	<p>Potencial bioquímico de metano total</p>

Fuente: Adaptado de (Parra Orobio, 2014)

3.2.3. Modelo Gompertz

La evaluación de la influencia y la proporción del co-sustrato en las mezclas sobre la producción de metano se hizo a través del modelo Gompertz, el cual permitió determinar la tasa máxima de producción de metano, la producción máxima de metano y la fase de letargo de la digestión anaerobia. La fase de letargo hace énfasis en el tiempo en el que el sustrato y co-sustrato se transforman y su relación con la fase de producción de biogás (Parra Orobio, 2014).

Para la realización del modelo Gompertz se usaron dos tipos de datos, datos experimentales, obtenidos a partir de medir la presión con el sistema OxiTop para luego calcular el volumen producido de CH₄, y datos teóricos, calculados con la ecuación del modelo (Ecuación 2)

$$V_{CH_4} = Pm_{\acute{a}x} * exp \left\{ - exp \left[\frac{Rm_{\acute{a}x} * exp(1)}{Pm_{\acute{a}x}} (\lambda - t) + 1 \right] \right\} \quad Ec. 2$$

V_{CH_4} = Producción acumulada de metano ($L \cdot d^{-1}$)

$P_{m\acute{a}x}$ = Máxima producción acumulativa de metano al culminar el experimento (L)

$R_{m\acute{a}x}$ = Máxima velocidad de producción metano ($L \cdot d^{-1}$)

λ = Fase de letargo (d)

t = Tiempo de generación de metano (d)

3.2.4. Análisis de datos

El análisis de datos se realizo por medio de la herramienta de Excel, Solver, en la cual se introducen los datos obtenidos y se aplico el Modelo Gompertz para determinar la producción máxima de metano y la tasa de producción máxima para calcular la AME y el PBM. Además, se hizo la caracterización fisicoquímica del inóculo, sustrato y co-sustrato, la cual se analizo teniendo como base la literatura y así poder comparar los resultados del estudio.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE DATOS

4.1. CARACTERIZACIÓN DEL INÓCULO

El inóculo caracterizado se obtuvo a partir de una muestra puntual recolectada del reactor UASB de la PTAR de Bavaria S.A.

4.1.1. Caracterización fisicoquímica del inóculo

Los resultados obtenidos de la caracterización fisicoquímica del inóculo se presentan en la tabla 8.

Tabla 8. Caracterización fisicoquímica del inóculo.

INOCULO		
PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
pH	6.8	Unidades de pH
Sólidos Totales (ST)	79.4	g ST/l
Sólidos Volátiles (SV)	17.6	g SV/l
Relación SV/ST	0.222	
cidos Grasos Volátiles (AGV)	119	mg AGV/l

Fuente: Autores.

Según Mirmohamadsadeghi et al. (2019), el rango de pH óptimo para garantizar las condiciones adecuadas en cada etapa de la digestión anaerobia es de 6.8 hasta 8.0 pues influye en la velocidad de crecimiento de los microorganismos anaerobios (Campos Pozuelo, 2001). El pH obtenido para el inóculo fue de 6.8 lo cual demuestra que se encuentra dentro del rango recomendado.

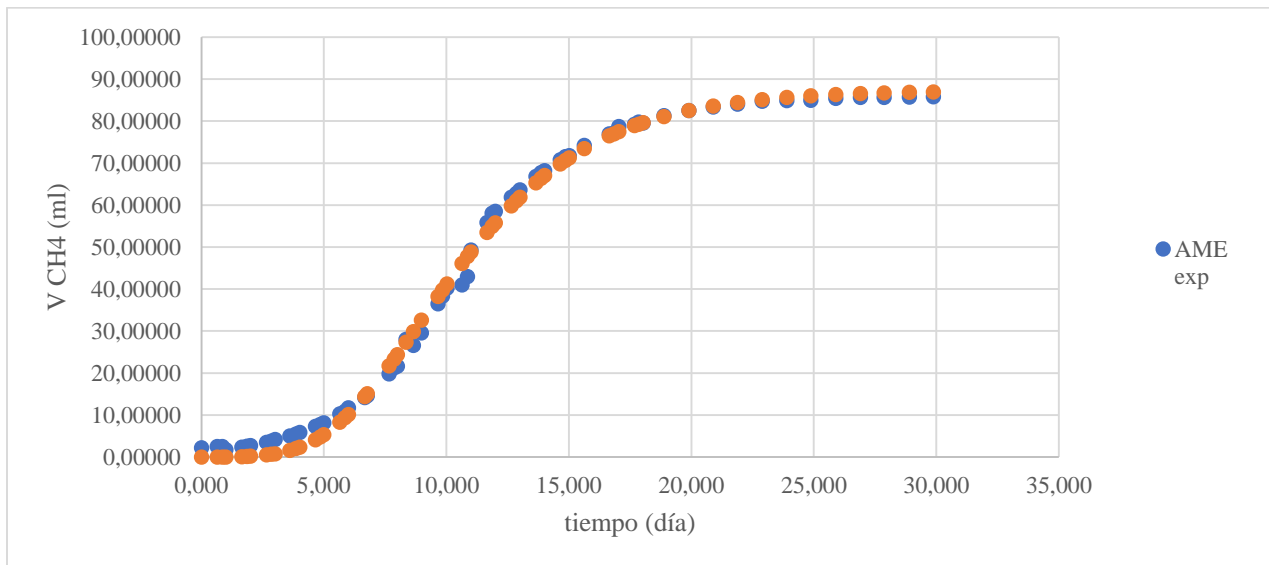
La relación SV/ST obtenida fue de 0.222, ST 79.4 g/l y SV 17.6 g/l. La relación SV/ST se espera que sea mayor a 0.7 (Cáceres Cáceres & Rincón Perez, 2018) para garantizar un buen desarrollo de la digestión anaerobia, sin embargo, esta no alcanza ese valor. Para ST, en un estudio realizado por Parawira et al. (2005) se caracterizó el lodo anaerobio proveniente de una planta cervecera y obtuvieron datos inferiores que se encontraban en un rango de 5.1-8.75 mg/l.

La concentración de AGV obtenida fue 119 mg AGV/l, este valor es importante debido a que no altera el proceso y favorece su estabilidad pues no hay un riesgo de acumulación de AGV.

4.1.2. Actividad Metanogénica Específica

El volumen acumulado de metano a través del periodo del experimento se muestra en la figura 7.

Figura 6. Volumen de metano a condiciones estándar para el inóculo.



Fuente. Autores.

La figura 7 muestra las diferentes etapas de la digestión anaerobia. En el periodo inicial del día 0 al día 6, los microorganismos se encontraban en una etapa de adaptación al medio por lo que, la

producción metano es mínima en los primeros días. A partir del día 6 al día 30, se evidencia el consumo del sustrato y por ende el crecimiento exponencial del volumen de metano hasta llegar a la fase estacionaria. El volumen experimental máximo obtenido de metano fue 85.8 ml CH₄.

La AME se halló a partir de la tasa de producción máxima obtenida a través del modelo Gompertz y la herramienta Solver de Excel. La pendiente fue de 8.4 ml/día, la producción máxima de 87.4 ml y fase de letargo de 2.72 días similar a la calculada en el volumen experimental máximo. Por medio de la ecuación para la AME expresada en la tabla 2 y se obtuvo un valor de 0.0709 gDQO/gSV*d. Los datos obtenidos se muestran en la tabla 9.

Tabla 9. Datos obtenidos del modelo Gompertz para AME.

AME		
P_{máx}=	87,35659	ml
R_{máx}=	8,40351535	ml/día
λ=	5,10337513	día
e	2,71828	
AME	0,07091574	gDQO/gSV*d

Fuente: Autores.

Existen diferentes tipos de inóculos, entre los cuales se encuentran heces de animales, lodos anaerobios de reactores UASB, aguas residuales domésticas, aguas residuales industriales, entre otros. Cada uno presenta distintos valores de AME por sus propiedades físicas, químicas y biológicas. En esta investigación se caracterizaron 3 tipos de inóculos, el primero proveniente de la PTAR de la UPB Seccional Bucaramanga, el segundo fue de la PTAR municipal EMPAS y el tercero fue recolectado de la PTAR de una planta cervecera. Este último fue el seleccionado debido a que presentaba mejores características fisicoquímicas para la digestión anaerobia en comparación con los otros inóculos.

En un estudio realizado por Regueiro et al. (2012) en donde se evalúa la AME para 6 diferentes tipos de inóculo, determina este parámetro para en un lodo anaerobio proveniente de una cervecería y obtuvo un valor de 0.20 g DQO/g SV*d el cual es superior con el reportado en la presente investigación para el mismo tipo de inóculo. Regularmente se reporta que los lodos anaerobios de cervecerías presentan buenos resultados para AME, también existen otros inóculos que tienen mejor desarrollo microbiano, como es el caso del estiércol porcino con el que se realizó un estudio de optimización de la AME y se obtuvo un valor de 0.27 g DQO/g SV*d (Jiménez et al., 2015).

En comparación con la reportada por Cáceres et al. (2018) de 0.14 g DQO CH₄/ g SV*d para un lodo anaerobio proveniente de un reactor UASB de una empresa que trata vertimientos de agua azucarada, es casi el doble, es decir, presenta mejor actividad por parte de los microorganismos en la metanogénesis.

A pesar de que este inoculo se caracteriza por presentar valores superiores a 0.20 g DQO/g SV*d para la AME, no fue así en este caso pues se obtuvo un valor por debajo de lo usual. Pueden existir distintos factores que afecten la actividad de los microorganismos en la producción de metano, uno de ellos es el tiempo de retención del lodo, por lo que se cree que la muestra obtenida llevaba mucho tiempo en el reactor lo que disminuyo su concentración de microorganismos para la degradación de la materia orgánica y con esto su actividad metanogénica.

4.2. CARACTERIZACIÓN DEL SUSTRATO

El sustrato caracterizado se obtuvo a partir de muestras diarias de desechos alimenticios cocidos provenientes de la cafetería Kilimanjaro del edificio K ubicada en la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga.

4.2.1. Caracterización fisicoquímica del sustrato

La tabla 10 muestra los datos obtenidos a través de la caracterización fisicoquímica de los desechos alimenticios cocidos como sustrato.

Tabla 10. Caracterización fisicoquímica del sustrato.

SUSTRATO		
Parámetro	Valor	Unidad
pH	4.7	Unidades de pH
Humedad	75.3	%
Sólidos Totales	23.0	%
Sólidos Volátiles	22.1	%
Relación SV/ST	0.959	
DQO	66036	mg O ₂ /l
DBO	35286	mg O ₂ /l
DBO/DQO	1.87	

Nitrógeno Total Kheldalj	571	mg NTK/l
Nitrógeno Amoniacal	28.3	mg N-NH ₃ /l
Realación C/N	116	
Fósforo	0	
Ácidos Grasos Volátiles	1559	mg AGV /l

Fuente: Autores

El pH promedio obtenido fue 4.7 unidades, lo cual puede ser inhibitorio para el proceso debido a que, el rango de pH ideal para hidrólisis, acetogénesis y metanogénesis se encuentra entre 6.0, 6.0-7.0, 6.5-7.5 respectivamente (Leung & Wang, 2016). Sin embargo, la producción de metano es mayor cuando el pH es menor a 5.0 unidades, ya que, esta condición estimula la formación de las bacterias generadoras de ácido y de metano (Gerardi & Somerset, 2004).

El porcentaje de humedad de los desechos alimenticios cocidos fue 75,3%, evidenciando alto contenido de agua en el residuo. Los sólidos totales y sólidos volátiles del sustrato fueron 23% y 22.1% respectivamente, y su relación fue de 0.959. Solarte Toro et al. (2017), reporta valores similares de ST y SV como 29% y 25.3% y la relación de 0.87, para el mismo tipo de sustrato. Los valores obtenidos comprueban que los residuos son fácilmente biodegradables por su contenido de materia orgánica, además, la relación SV/ST garantiza la correcta digestión anaerobia.

El alto contenido de materia orgánica fácilmente biodegradable se evidencia a partir de los datos obtenidos de DBO y DQO que fueron 66036 mg O₂/l y 35286 mg O₂/l respectivamente. La relación DQO/DBO₅ es un indicador de la naturaleza biodegradable del sustrato pues es inferior a 2.5 (Osorio & Peña, n.d.).

El nitrógeno amoniacal NH₃ en concentraciones superiores a 3000 mg N-NH₃/l puede ser inhibitorio para la actividad microbiana, los principales microorganismos afectados por el amonio son los metanogénicos (Calli, Mertoglu, Inanc, & Yenigun, 2005). El valor obtenido de nitrógeno amoniacal fue 28.3 mg N-NH₃/l, lo cual demuestra que no es una amenaza para el proceso, sino que, aporta al crecimiento de los microorganismos (Angulo Mosquera & Loaiza Gualtero, 2016).

Lo recomendado para la relación C/N es que se encuentre entre 20-30, pues tiene efectos positivos sobre la producción de metano y la degradación de residuos orgánicos en la digestión anaerobia

(Parra Orobio, 2014). El valor obtenido para el sustrato fue de 116, es decir, tiene mayor contenido de carbono que de nitrógeno y supera los valores establecidos.

Los ácidos grasos volátiles (AGV) son los principales inhibidores de la digestión anaerobia, pues su acumulación puede causar la acidificación del medio, desestabilizar el proceso y disminuir la producción de biogás. Los AGV para el sustrato fueron 1559 mg AGV/l, Bharati Barua et al. (2018), reporta 1250 mg AGV/l para residuos de cocina, estos valores indican que es un residuo fácilmente biodegradable.

Los desechos alimenticios cocidos no obtuvieron presencia de fosforo, este tipo de residuo presenta valores muy bajos del nutriente que tienden a cero (Buenrostro, Cram, Bernache, & Bocco, 2000) y se relaciona con la falta de vegetales y leguminosas (Parra Orobio, 2014), ya que, la muestra se componía principalmente de carbohidratos y una pequeña porción de proteína.

4.3. CARACTERIZACIÓN DEL CO-SUSTRATO

Los co-sustratos caracterizados para la co-digestión anaerobia fueron muestras de jacinto de agua y residuos de poda recolectadas en la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga.

4.3.1. Caracterización fisicoquímica de jacinto de agua

La tabla 11 muestra los resultados de la caracterización fisicoquímica del co-sustrato jacinto de agua

Tabla 11. Caracterización fisicoquímica de jacinto de agua.

JACINTO DE AGUA		
Parámetro	Valor	Unidad
pH	5.11	Unidades de pH
Humedad	93.1	%
Solidos Totales	6.98	%
Solidos Volátiles	5.43	%
Relación SV/ST	0.78	
Relación C/N	20.6	-
DQO	6207	mg O ₂ /l

DBO	1134	mg O ₂ /l
Nitrógeno Total Kheldalj	300.77	mg NTK /l
Nitrógeno Amoniacal	74.56	mg N-NH ₃ /l
Fósforo	32.2	mg PO ₄ /l
Ácidos Grasos Volátiles	321.4	mg AGV/l

Fuente: Autores.

El jacinto de agua presentó un pH promedio de 5.11, valor que se considera ligeramente ácido. Los AGV obtenidos fueron de 321.4 mg AGV/l, Bharati Barua et al. (2018), reportó en su estudio un valor de AGV de 750 mg AGV/l. Aunque, es superior a la concentración del co-sustrato caracterizado, este no afecta la estabilidad de la digestión anaerobia.

Los sólidos totales y sólidos volátiles fueron 6.98% y 5.43%, respectivamente, la relación SV/ST fue 0.78. En un estudio realizado para la biometanización del jacinto de agua, se obtuvo una relación SV/ST de 0.79, similar a la reportada para el co-sustrato. El contenido de humedad representa un 80-90% del total de sólidos volátiles (Rathod et al., 2018), el porcentaje de humedad fue 93.1%, lo cual evidencia su naturaleza acuática.

La relación C/N fue 20.6, la cual se encuentra dentro del rango óptimo de 20-30 para esta relación, por lo que, tiene la cantidad adecuada de estos nutrientes esenciales para el crecimiento de los microorganismos encargados de la digestión anaerobia (Parra Orobio, 2014).

Los valores obtenidos para nitrógeno amoniacal y fósforo están relacionados con la absorción de nutrientes (nitrógeno y fosforo) por parte de la planta. Los datos fueron de 74.56 mg/l para NH₃ y 32.2 mg/l para fósforo. Según Priya et al. (2018), los valores para estos nutrientes fueron 54 y 15 para nitrógeno y fósforo, respectivamente, siendo menores a los reportados en la presente investigación.

4.3.2. Caracterización fisicoquímica de residuos de poda

En la tabla 12 se muestran los datos obtenidos de la caracterización de los residuos de poda como co-sustrato.

Tabla 12. Caracterización fisicoquímica de residuos de poda.

RESIDUOS DE PODA		
Parámetro	Valor	Unidad
pH	5.77	Unidades de pH
Humedad	70.8	%
Sólidos Totales	33.7	%
Sólidos Volátiles	30.1	%
Relación SV/ST	0.893	
DQO	1628	mg O ₂ /l
DBO	964	mg O ₂ /l
Nitrógeno Amoniacal	2.10	mg N-NH ₃ /l
Nitrógeno Total Kheldalj	67	mg NTK/l
Relación C/N	24.3	
Fósforo	8.99	mg PO ₄ /l
Ácidos Grasos Volátiles	150	mg AGV/l

Fuente: Autores.

La relación SV/ST fue 0.893, esto evidencia el alto contenido de materia orgánica presente en el co-sustrato. Estos valores son semejantes a los reportados por Solarte Toro et al. (2017), en el que la relación SV/ST fue 0.921, en un estudio de digestión anaerobia a partir de residuos de comida y de poda. Esto demuestra el alto grado de biodegradabilidad del co-sustrato. El alto contenido de agua se comprobó a través del porcentaje de humedad con 70.8.

La relación C/N fue 24.3, la cual se encuentra dentro del rango óptimo de 20-30 para el desarrollo de la digestión anaerobia. Solarte Toro et al. (2017), reporta una relación de 19, esta es similar, aunque es inferior a la obtenida en este estudio. Mu et al. (2019), realizó la caracterización para residuos de jardín y halló una relación C/N de 74.4, lo cual demuestra la variabilidad de los materiales que componen este tipo de residuo como diferentes tipos de plantas y sus propiedades según factores externos.

Se encontró una baja concentración de AGV con 150 mg AGV/l, lo cual disminuye el riesgo de inhibición del proceso por acumulación de AGV, pues en los residuos de poda existe alto riesgo de acidificación del medio en la fase de producción de metano (Solarte Toro et al., 2017).

4.4. CARACTERIZACIÓN DE LAS MEZCLAS SUSTRATO-COSUSTRATO

La tabla 13 muestra los resultados obtenidos de la caracterización fisicoquímica de las mezclas sustrato-cosustrato.

Tabla 13. Caracterización fisicoquímica de las mezclas.

MEZCLA	PH	RELACIÓN C/N
20CO:80JA	6.58	24.8
30CO:70JA	6.53	55.6
20CO:80PO	6.71	25.8
30CO:70PO	6.68	193.7

CO: Desechos Alimenticios Cocidos, **JA:** Jacinto de Agua, **PO:** Residuos de Poda **Fuente:** Autores.

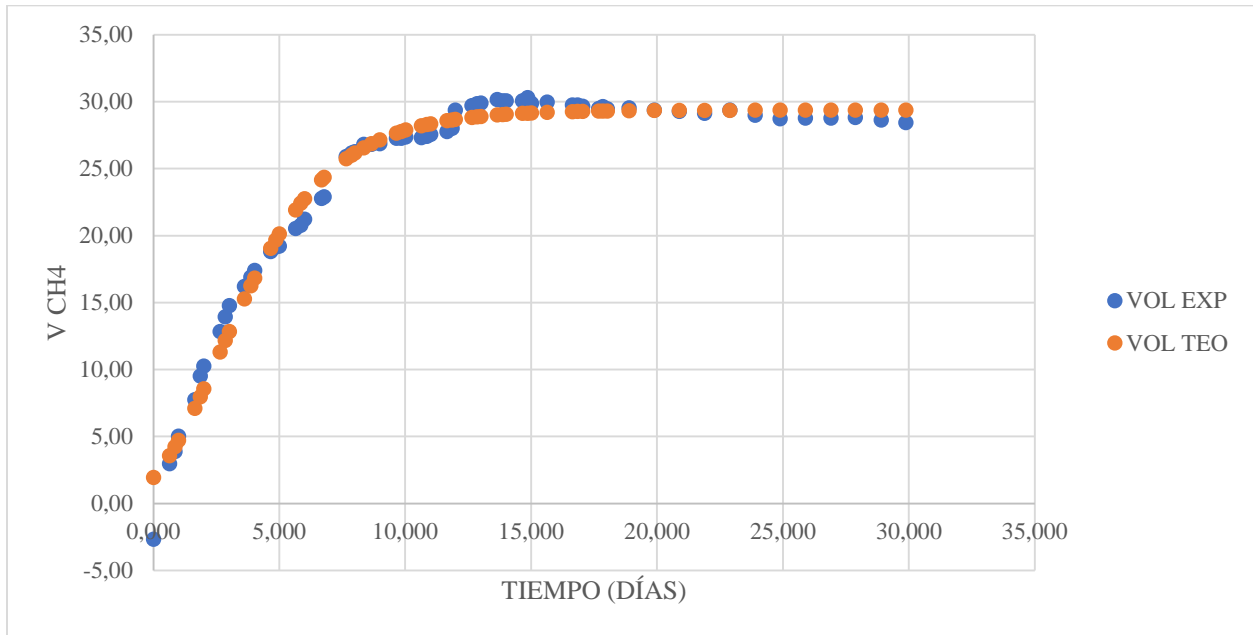
La relación C/N para las mezclas muestran que, de las dos proporciones escogidas, la relación de 20:80 presentó valores que se encuentran en el rango óptimo para este parámetro, siendo 24.8 para 20CO:80JA y 25.8 20CO:80PO. En comparación, la relación 30:70 obtuvo valores superiores al rango recomendado y presenta gran variación entre ellas, 55.6 para 30CO:70JA y 193.7 30CO:70PO. Esto podría afectar la producción de metano a partir de la co-digestión anaerobia para estas mezclas. El pH para las cuatro mezclas fue neutro lo cual garantiza el buen funcionamiento del proceso.

4.5. INFLUENCIA DEL TIPO DE CO-SUSTRATO UTILIZADO EN LA CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE DESECHOS ALIMENTICIOS COCIDOS SOBRE LA PRODUCCIÓN DE METANO

4.5.1. PBM Desechos Alimenticios Cocidos

La figura 8 muestra la producción metano a partir de la digestión anaerobia de desechos alimenticios cocidos.

Figura 7. Volumen de metano a condiciones estándar de desechos alimenticios cocidos.



Fuente. Autores.

Se observó que la fase de adaptación de los microorganismos anaerobios fue durante los primeros 5 días y tuvo un consumo acelerado del sustrato. El mayor volumen obtenido fue de 30.31 ml CH₄ en el día 14.863, después inicio la fase estacionaria donde las bacterias consumieron de manera constante el alimento disponible.

La producción máxima se halló a partir del modelo Gompertz y con la ecuación para PBM mostrada en la tabla 7 y teniendo en cuenta los gramos de sólidos volátiles del sustrato añadidos al sistema se calculó el PBM. En la tabla 14 se muestran los valores obtenidos del modelo.

Tabla 14. Datos obtenidos del modelo Gompertz para PBM de desechos cocidos.

DESECHOS COCIDOS		
P_{máx}=	29,3804063	ml
R_{máx}=	4,26477157	ml/d
λ=	0	d
e	2,71828	
PBM	326,448959	ml CH ₄ /g SV

Fuente: Autores.

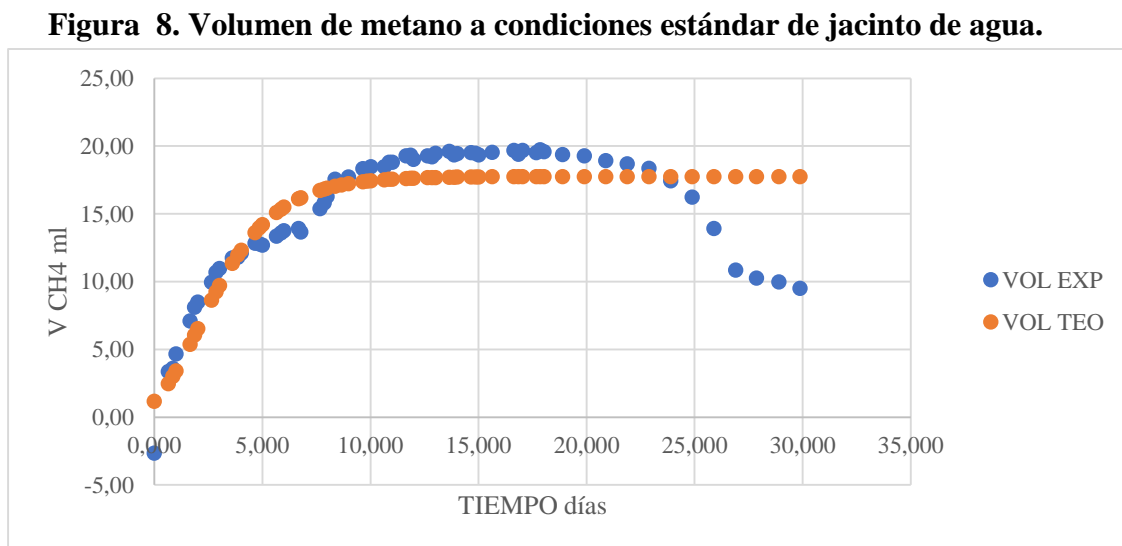
El potencial bioquímico de metano obtenido fue 326,448959 ml CH₄/g SV, este resultado es similar a los reportados por Kumar et al. (2019), quien hace una comparación de diferentes estudios de co-digestión anaerobia a partir de desperdicios de comida, en ella presenta un rango desde 346-548 ml CH₄/g SV, sin embargo, cada estudio presentado en dicho artículo se hace en bioreactores de gran escala donde se añadían mayores cantidades del sustrato. Solarte Toro et al. (2017), trabajaron con un biorreactor de 3 litros y añadieron 300 g de residuos de comida del cual obtuvo PBM de 455 ml CH₄/g SV, lo cual evidencia la influencia de la cantidad del sustrato añadido en la producción de metano.

Parra Orobio (2014) realizó su investigación utilizando el sistema OxiTop para determinar el PBM de residuos alimenticios, de este obtuvo un rango de 17.56-176.19 ml CH₄/ g SV, los cuales se encuentra por debajo del valor obtenido por la presente investigación. Esto debido a que las muestras que utilizaron contenían residuos de alimentos crudos, lo cual se vio reflejado en el PBM.

El valor obtenido puede considerarse inferior a otros presentados en investigaciones similares, esto puede ocurrir por distintos factores como, variabilidad de la muestra, cantidad añadida, tipo de medición, reactores utilizados, entre otros.

4.5.2. PBM Jacinto de Agua

En la figura 9 se evidencia el comportamiento de los microorganismos frente al sustrato evaluado.



Fuente. Autores.

La producción máxima se obtuvo en el día 17.849 y fue de 19.73 ml de CH₄, a partir del día 20, la producción empezó a decrecer debido a la poca disponibilidad de alimento y alcanzó la fase de muerte.

Mediante el modelo Gompertz y la ecuación para PBM se obtuvieron los valores para el cálculo de PBM, los cuales se muestran en la tabla 15.

Tabla 15. Datos obtenidos del modelo Gompertz para PBM de jacinto de agua.

JACINTO DE AGUA		
P_{máx}=	17,7538159	ml
R_{máx}=	3,26157963	ml/d
λ=	0	d
E	2,71828	
PBM	197,264621	ml CH ₄ /g SV

Fuente: Autores.

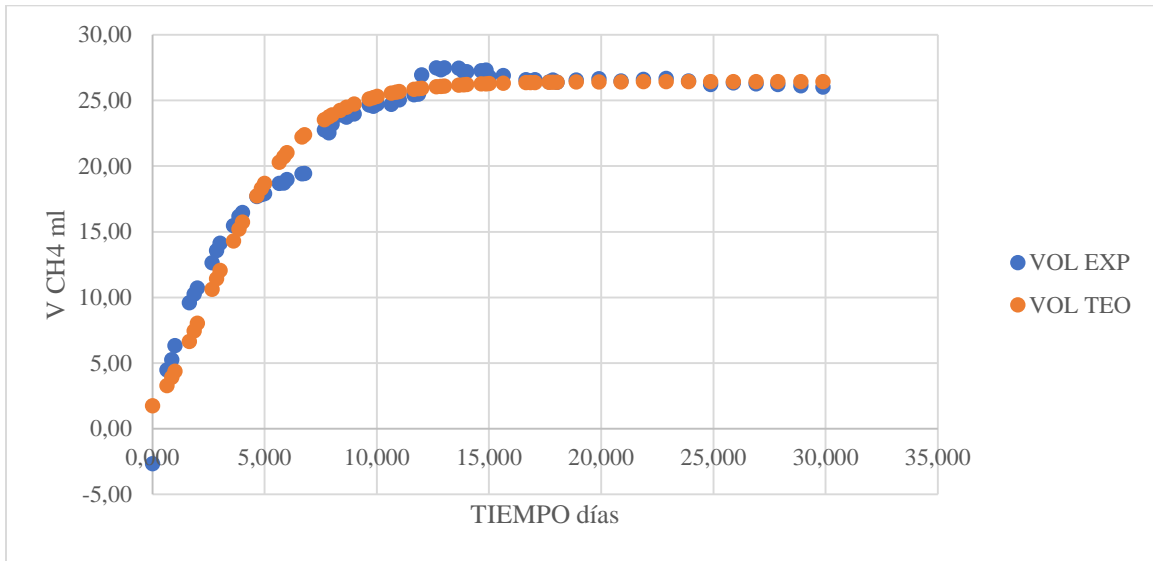
En lo que respecta al valor obtenido de PBM 197,264621 ml CH₄/g SV se encontró que Sullivan et al. (2010), evaluaba plantas acuáticas, entre ellas el jacinto de agua para la cual reportó un valor inferior de 140 ml CH₄/ g SV. También, analizó plantas con propiedades similares como Camboba y Salvinia, y obtuvieron resultados de 109 y 84 ml CH₄/ g SV, respectivamente, lo cual indica que, entre las plantas de su categoría, el jacinto de agua es una de las mejores alternativas.

Además, Koyama et al. (2014), confirma lo expuesto anteriormente, mediante la comparación de estudios relacionados con la digestión anaerobia de jacinto de agua y presenta valores de PBM que se encuentran en un rango de 140-209 ml CH₄/g SV para esta planta dentro del cual se encuentra el resultado obtenido en esta investigación.

4.5.3. PBM Residuos de Poda

La figura 10 muestra un comportamiento exponencial del volumen producido de metano a partir de la digestión anaerobia de residuos de poda.

Figura 9. Volumen de metano a condiciones estándar de residuos de poda.



Fuente. Autores.

Se evidencia un incremento acelerado en los 10 primeros días y después se inicia la estabilización del sistema a través del consumo permanente de los nutrientes. El valor máximo de volumen de metano fue 27.48 ml en el día 13.

De acuerdo con los datos obtenidos por el modelo Gompertz y la ecuación para PBM, se determinó el PBM de residuos de poda.

Tabla 16. Datos obtenidos del modelo Gompertz para PBM de residuos de poda.

RESIDUOS DE PODA		
P_{máx}=	26,4386161	ml
R_{máx}=	4,00824464	ml/d
λ=	0	d
e	2,71828	
PBM	293,762401	ml CH ₄ /g SV

Fuente: Autores.

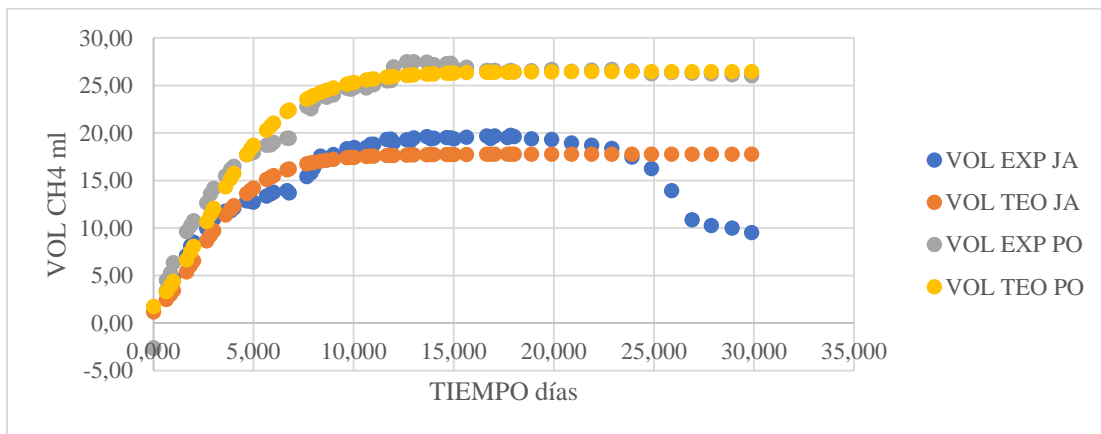
El PBM calculado fue 293,762401 ml CH₄/g SV, Solarte Toro et al. (2017), presenta el valor de PBM para residuos de poda, el cual es 323 ml CH₄/g SV siendo ligeramente superior al obtenido. Mu et al. (2019) expone en su investigación un valor inferior de 116 ml CH₄/g SV para residuos de jardín en un reactor de 300 ml. Existe una gran diferencia entre ellos que puede estar asociada

a la variación de materiales encontrados en la muestra, mientras que los residuos de poda solo tienen un material, los residuos de jardín tienen diferentes tipos de plantas, hojas, poda, tallos, y diversos suelos.

4.5.4. Influencia del tipo de co-sustrato

La influencia del tipo de co-sustrato es importante para evaluar cual tuvo un mejor comportamiento y su incidencia en el desarrollo de la co-digestión anaerobia en cada mezcla.

Figura 10. Volumen de metano a condiciones estándar de residuos de poda y jacinto de agua.



Fuente. Autores.

Tabla 17. Datos obtenidos del modelo Gompertz para PBM.

DATOS GOMPERTZ	RESIDUOS DE PODA	JACINTO DE AGUA
P_{máx} (ml)	26,4386161	17,7538159
R_{máx} (ml/d)	4,00824464	3,26157963
λ (d)	0	0
e	2,71828	2,71828
PBM (ml CH₄/g SV)	293,762401	197,264621

Fuente: Autores.

De acuerdo con la figura 11, se puede comparar el volumen de metano obtenido experimental y teóricamente para residuos de poda y jacinto de agua, para lo cual se observa que, los residuos de poda obtuvieron un mejor comportamiento por parte de los microorganismos metanogénicos y por ende mayor potencial de producción de metano reflejado en el volumen conseguido. A partir del

volumen teórico hallado con la ecuación del modelo Gompertz, se refleja la congruencia entre los valores obtenidos y las fases desarrolladas en el proceso. La fase de latencia fue corta lo que indica una buena relación entre el inoculo y el sustrato (Angulo Mosquera & Loaiza Gualtero, 2016).

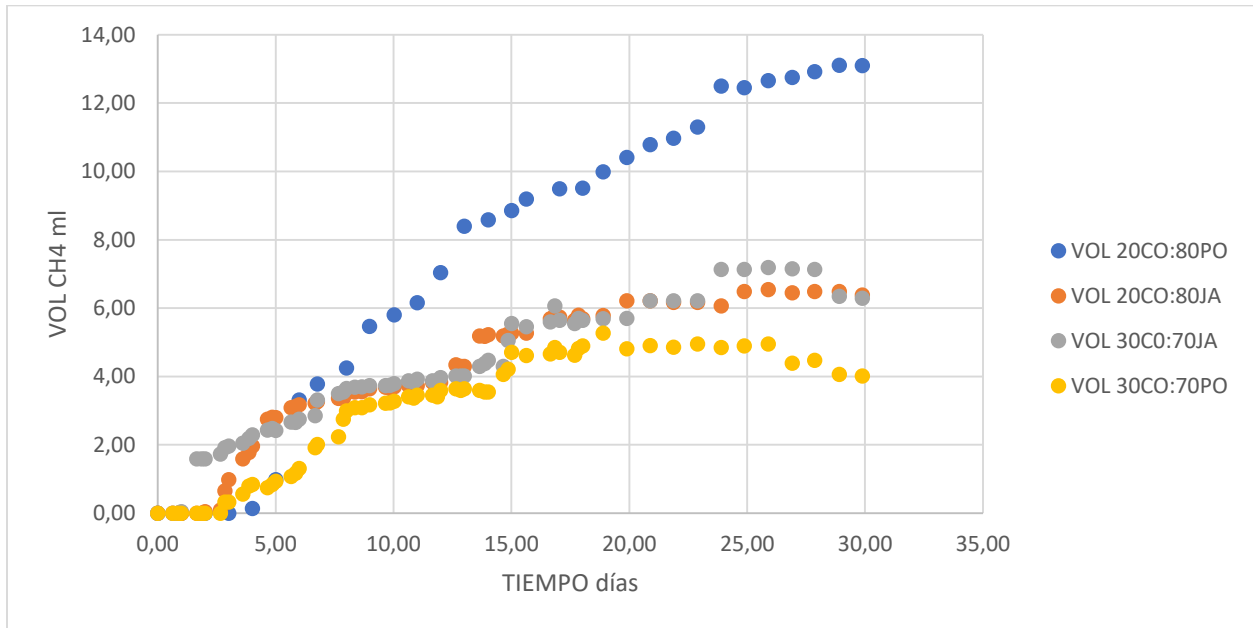
Los resultados de PBM fueron 293,762401 ml CH₄/g SV y 197,264621 ml CH₄/g SV para residuos de poda y jacinto de agua como se muestra en la tabla, respectivamente. Se evidencia que los residuos de poda tuvieron un mejor potencial metanogénico en comparación con el jacinto de agua. Existen diferentes factores que afectan la producción metano para cada co-sustrato, uno de ellos es la concentración de sólidos volátiles, con respecto a los residuos de poda se obtuvo un alto porcentaje promedio de SV de 30.1%, lo que hace viable su digestión anaerobia y es una buena alternativa para ser aplicado como co-sustrato (Mu et al., 2019).

Para jacinto de agua la concentración promedio de SV fue 5.43%, la mono-digestión anaerobia no es una alternativa factible para aplicar como aprovechamiento de esta planta acuática debido a su baja concentración de SV, sin embargo, la co-digestión anaerobia lo convierte en un proceso más eficiente. Los desechos alimenticios cocidos aportan los SV deficientes del jacinto de agua debido a una mayor concentración de estos con un promedio de 22.1%. Aunque, al aplicarle tratamientos térmicos y químicos al jacinto de agua se le puede incrementar su concentración de SV y a su vez la producción de metano a través de la co-digestión anaerobia (Carlini, Castellucci, & Mennuni, 2018).

4.6. INFLUENCIA DE LA PROPORCIÓN DE LOS CO-SUSTRATOS UTILIZADOS EN LA CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE DESECHOS ALIMENTICIOS SOBRE LA PRODUCCIÓN DE METANO.

En la figura 12 se muestra la producción de metano de las cuatro mezclas escogidas de desechos alimenticios cocidos como sustrato, jacinto de agua y residuos de poda como co-sustratos. Las proporciones fueron 30:70 y 20:80.

Figura 11. Volumen experimental de metano a condiciones estándar de las mezclas.



Fuente. Autores.

Tabla 18. Datos obtenidos del modelo Gompertz para las mezclas.

DATOS GOMPERTZ	20CO:80JA	30CO:70JA	20CO:80PO	30CO:70PO
P_{máx} (ml)	6,38771521	6,94438164	12,7216408	4,69364765
R_{máx} (ml/d)	0,43968496	0,3863519	0,88410627	0,50111526
λ (d)	0,66828507	0	3,8805012	2,71828
PBM (ml CH₄/g SV)	70,9746134	77,1597961	141,351565	52,1516406

CO: Desechos Alimenticios Cocidos, **JA:** Jacinto de Agua, **PO:** Residuos de Poda **Fuente:** Autores.

Las mezclas empezaron a generar volumen acumulado de metano desde el primer día del experimento, sin embargo, se encontraban por debajo de la producción del inóculo, por lo tanto, su volumen neto era negativo, unas mezclas superaron dicha producción más rápido que otras. Se tenían dos proporciones para cada tipo de co-sustrato, en el caso de jacinto de agua la proporción que más generó metano fue 30CO:70JA con PBM de 77.16 ml CH₄/g SV, en comparación con la mezcla 20CO:80JA que obtuvo 70.97 ml CH₄/g SV. Para los residuos de poda, la mezcla de mayor rendimiento fue 20CO:80PO, esta reportó PBM de 141.35 ml CH₄/g SV teniendo el mayor volumen producido de todas las mezclas, la otra proporción del mismo tipo de co-sustrato presentó el más bajo PBM de las cuatro con 52.15 ml CH₄/g SV.

De acuerdo con la mezcla 20CO:80PO se puede analizar la influencia de las características fisicoquímicas, como es el caso de la relación C/N y el porcentaje de SV, parámetros que son fundamentales en la producción de metano. La relación C/N obtenida para esta mezcla fue 25.8, el cual es un valor óptimo dentro del rango que garantiza el buen funcionamiento del proceso. El porcentaje de SV de cada residuo representa el alto contenido de materia orgánica de estos y su fácil biodegradabilidad, por tanto, una mejor adaptación de los microorganismos a la mezcla. Solarte Toro et al. (2017) realizaron un estudio de la co-digestión anaerobia a partir de residuos de comida y de poda, para lo que reportaron un PBM de 560 ml CH₄/g SV, superior al presentado en esta investigación. Mu et al. (2019), difieren de este resultado pues exponen valores de PBM entre 165 ml CH₄/g SV para una mezcla con el mismo tipo de residuos y de proporciones similares.

Según Cáceres et al. (2018), el rendimiento de la producción de metano se veía afectado por la relación C/N, es decir, a mayor relación C/N mayor es el tiempo de digestión para generación de biogás. Esto puede evidenciarse en la mezcla 30CO:70PO, la cual presentó relación C/N de 193.7 y fue el menor PBM obtenido del sistema.

Respecto a las proporciones en las que se utilizaba jacinto de agua como co-sustrato se observó que no hay gran diferencia entre ellas, pero el PBM obtenido para ambas fue bajo en comparación con el reportado por Bharati Barua et al. (2018) quienes ejecutaron una investigación a partir de la co-digestión anaerobia de residuos de comida y jacinto de agua con y sin pretratamiento, para lo que obtuvo valores entre 176 y 206 ml CH₄/g SV, respectivamente. Este tipo de co-sustrato es usualmente pretratado para elevar su porcentaje de SV y así poder aportar materia orgánica fácilmente biodegradable por los microorganismos anaerobios. En esta investigación no se realizó un pretratamiento a la planta, la cual tenía muy bajo porcentaje de SV y no aportaba el alimento necesario para el buen funcionamiento del proceso.

Con base a la relación S/I propuesta por Parra Orobio et al. (2015) se escogió la relación 0.3 g SV sustrato/g SV inoculo, pues era la que mejor se adaptaba a los objetivos planteados y de allí se determinó la masa agregada al sistema teniendo como fundamento la relación C/N para elegir la proporción óptima y los SV para calcular la masa en gramos de cada uno, los valores exactos se muestran en la tabla 6.

Los datos obtenidos de PBM para las cuatro mezclas no fueron los esperados, pues todos eran inferiores a los controles para sustrato y co-sustratos, se tienen hipótesis de porqué se dio este comportamiento en la co-digestión anaerobia. Inicialmente, el inóculo no favoreció el buen desarrollo del proceso debido a la baja concentración microorganismos que afectaban la actividad metanogénica, esto se evidenció a través del cálculo de la AME. Otros factores que influyeron en los resultados fueron, el tamaño del reactor y la cantidad adicionada del sustrato y co-sustrato en el mismo, para esta investigación se utilizaron botellas de 250 ml y se añadieron cantidades que no fueron significativas y suficientes para que los microorganismos se desarrollaran adecuadamente en el medio, así lo demuestran diferentes autores (Kumar et al., 2019; Solarte Toro et al., 2017) que realizaron experimentos similares pero en escalas mayores, en donde obtuvieron mejores resultados de PBM. Dichos procesos fueron trabajados en reactores de mayor capacidad y agregaron cantidades superiores a la del presente proyecto.

5. CONCLUSIONES

Los valores obtenidos a partir de la caracterización del inóculo no fueron idóneos para garantizar el buen desarrollo de la digestión anaerobia, pues la relación SV/ST fue 0.2 y su AME de 0.0709 gDQO/gSV*d se encuentra por debajo de lo usual. Sin embargo, el blanco realizado para la prueba de PBM demostró que había una generación de metano por parte del inóculo.

El sustrato y co-sustratos caracterizados presentaron valores favorables para la digestión anaerobia, la cual se evidencia en el alto contenido de materia orgánica a través de los porcentajes de ST, SV y humedad. En cuanto a la concentración de los nutrientes nitrógeno y fósforo en cada residuo, se obtuvo mayor concentración de estos en los co-sustratos que en el sustrato debido a su naturaleza y su composición.

El PBM del sustrato y co-sustratos utilizados como único sustrato en los controles fue bueno y se encuentra dentro de los valores típicos, lo cual demuestra que el tratamiento de este tipo de residuos a través de la digestión anaerobia de cada uno puede ser una alternativa de aprovechamiento viable y eficiente, los valores obtenidos fueron 326.45 ml CH₄/g SV para desechos alimenticios cocidos, 197.26 ml CH₄/g SV para jacinto de agua y 293.76 ml CH₄/g SV para residuos de poda.

La co-digestión anaerobia a partir de las cuatro condiciones experimentales definidas no fue la esperada, pues sus valores de PBM en todas sus proporciones estuvieron por debajo de los PBM calculados para los controles. En el caso de residuos de poda la de mayor rendimiento fue la mezcla de 20:80 con 141.35 ml CH₄/g SV y para jacinto de agua fue 30:70 con 77.16 ml CH₄/g SV.

RECOMENDACIONES

Evaluar la composición de los componentes orgánicos del sustrato y co-sustrato para tener un mejor aproximado de su potencial biodegradable que aporte a la eficiencia del proceso.

Contemplar diferentes tipos de co-sustratos para la realización de las mezclas para optimizar la producción de biogás.

Realizar la actividad metanogénica específica (AME) para diferentes tipos de inóculo y así determinar el óptimo para la digestión anaerobia.

BIBLIOGRAFIA

- Alexis, P. B., Valle, U., Carlos, V., Valle, U., Patricia, T., Valle, U., ... Valle, U. (2015). Efecto de la relación sustrato-inóculo sobre el potencial bioquímico de metano de biorresiduos de origen municipal Effect of Substrate-Inoculum Ratio on the Biochemical Methane Potential of Municipal Biowastes, (número 4), 515–526.
- Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, J. L., Guwy, A. J., ... Lier, J. B. Van. (2009). Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops : a proposed protocol for batch assays, 927–935.
<https://doi.org/10.2166/wst.2009.040>
- Angulo Mosquera, L. S., & Loaiza Gualtero, J. S. (2016). Evaluación de la Mezcla de Inóculos como Estrategia de Mejoramiento de la Digestión Anaerobiade Residups de Alimentos. *Universidad Del Valle*, 1–76.
- APHA. (1999). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater Part 1000 Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. *Water Environment Federation*.
- Bharati Barua, V., Rathore, V., & Kalamdhad, A. S. (2018). Comparative evaluation of anaerobic co-digestion of water hyacinth and cooked food waste with and without pretreatment. *Bioresource Technology Reports*, 4(October), 202–208.
<https://doi.org/10.1016/j.biteb.2018.11.002>
- Buenrostro, O., Cram, S., Bernache, G., & Bocco, G. (2000). LA DIGESTIÓN ANAEROBIA COMO ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO A LOS RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS GENERADOS EN LOS MERCADOS MUNICIPALES. *Int. Contaminación Ambiental*, 16(1), 19–26.
- Cáceres Cáceres, K. T., & Rincón Perez, A. (2018). EVALUACIÓN DEL POTENCIAL BIOQUÍMICO DE METANO DEL AGUA RESIDUAL DE LA UPB SECCIONAL BUCARAMANGA, VARIANDO LAS CONDICIONES INICIALES DE PH Y MATERIA ORGÁNICA. *Universidad Pontificia Bolivariana*, 1–71.
- Calli, B., Mertoglu, B., Inanc, B., & Yenigun, O. (2005). Effects of high free ammonia

- concentrations on the performances of anaerobic bioreactors. *Process Biochemistry*, *40*, 1285–1292. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2004.05.008>
- Campos Pozuelo, A. E. (2001). Optimización de la digestión anaerobia de purines de cerdo mediante codigestión con residuos orgánicos de la industria agroalimentaria. *Universidad de Lleida*, 1–394.
- Cárdena-Cleves, Li. M., Parra-Orobio, B. A., Torres-Lozada, P., & Vásquez-Franco, C. H. (2016). Perspectivas del ensayo de Potencial Bioquímico de Metano - PBM para el control del proceso de digestión anaerobia de residuos. *Revista ION*, *29*(1), 95–108.
- Carlini, M., Castellucci, S., & Mennuni, A. (2018). Water hyacinth biomass : chemical and thermal pre-treatment for energetic utilization in anaerobic digestion process Water hyacinth chemical and thermal for The 15th biomass : utilization in anaerobic digestion * process Assessing the feasibility of using. *Energy Procedia*, *148*, 431–438. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.106>
- Castillo, L., & Luzardo, M. (2013). Evaluación del manejo de residuos sólidos en la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga. *Revista Facultad De Ingenieria UPTC.*, *22*(34), 71–84. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=169428420009%0ACómo>
- Ferré, J., & Rius, F. X. (n.d.). Introducción al diseño estadístico de experimentos, 1–12.
- Field, J. (1987). Parametros operativos del manto de lodos anaeróbicos de flujo ascendente.
- Gerardi, M. H., & Somerset, W. (2004). The Microbiology of Anaerobic Digesters. *Journal of Hazardous Materials*, *106*(8), 20693. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2003.10.001>
- Guardia-Puebla, Y., Jiménez-Hernández, J., Pacheco-Gamboa, R. F., Rodríguez-Pérez, S., & Sánchez-Girón, V. (2016). Multiple responses optimization on the anaerobic co-digestion of coffee wastewater with manures Optimización múltiple de respuestas en la codigestión anaerobia de aguas residuales de café con estiércoles. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, *25*(3), 54–64.
- Jaramillo Henao, G., & Zapata Márquez, L. M. (2008). Aprovechamiento de los Residuos Sólidos Orgánicos en Colombia. *Universidad de Antioquia*.

- Jiménez, J., Guardia-puebla, Y., Cisneros-ortiz, M. E., Morgan-sagastume, J. M., Guerra, G., & Noyola, A. (2015). Optimization of the specific methanogenic activity during the anaerobic co-digestion of pig manure and rice straw , using industrial clay residues as inorganic additive, *259*, 703–714. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.08.031>
- Koyama, M., Yamamoto, S., Ishikawa, K., Ban, S., & Toda, T. (2014). Anaerobic digestion of submerged macrophytes : Chemical composition and anaerobic digestibility. *Ecological Engineering*, *69*, 304–309. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.05.013>
- Kumar, S., Binti, F., Zain, S., & Kumar, B. (2019). The anaerobic digestion process of biogas production from food waste : Prospects and constraints. *Bioresource Technology Reports*, *8*(August), 100310. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100310>
- Lee, E., Bittencourt, P., Casimir, L., Jimenez, E., Wang, M., Zhang, Q., & Ergas, S. J. (2019). Biogas production from high solids anaerobic co-digestion of food waste , yard waste and waste activated sludge. *Waste Management*, *95*, 432–439. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.06.033>
- Leung, D. Y. C., & Wang, J. (2016). An overview on biogas generation from anaerobic digestion of food waste. *International Journal of Green Energy*, *13*(2), 119–131.
- Marcela, M., Anaya, M., Cáterin, J., & Pechene, Q. (2017). Current status of fruit and vegetable residues in Colombia, 194–201.
- Mirmohamadsadeghi, S., Karimi, K., & Tabatabaei, M. (2019). Biogas production from food wastes : A review on recent developments and future perspectives. *Bioresource Technology Reports*, *7*(April), 100202. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100202>
- Mosquera Calle, J. M., & Martinez Martinez, B. E. (2012). EVALUACION DE LA DIGESTION ANAEROBIA COMO ALTERNATIVA DE ESTABILIZACIÓN DE BIOSÓLIDOS PRODUCIDOS EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA. *Universidad Tecnológica de Pereira*, 1–104.
- Mu, L., Zhang, L., Zhu, K., Ma, J., Ifran, M., & Li, A. (2019). Anaerobic co-digestion of sewage sludge, food waste and yard waste: Synergistic enhancement on process stability and biogas

- production. *Science of the Total Environment*, 135–429.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135429>
- Naciones Unidas. (2017). Hacia un planeta sin contaminación. *UNEP/EA*, 3/25, 29.
- Osorio, P. C., & Peña, D. (n.d.). Determinación de la relación DQO/DBO 5 en aguas residuales de comunas con población menor a 25.000 habitantes en la VIII región., 0–18.
- Parawira, W., Kudita, I., Nyandoroh, M. G., & Zvauya, R. (2005). A study of industrial anaerobic treatment of opaque beer brewery wastewater in a tropical climate using a full-scale UASB reactor seeded with activated sludge, *40*, 593–599.
<https://doi.org/10.1016/j.procbio.2004.01.036>
- Parra Orobio. (2014). Producción De Metano a Partir De La Digestión Anaerobia De Biorresiduos De Origen Municipal, 79. Retrieved from
<http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/7645/1/7720-0446398.pdf>
- Pérez, A., & Torres, P. (2008). Indices de alcalinidad para el control del tratamiento anaerobio de aguas residuales fácilmente acidificables. *Ingeniería y Competitividad*, *10*(2), 41–52.
- Priya, P., Nikhitha, S. O., Anand, C., Nath, R. S. D., & Krishnakumar, B. (2018). Biomethanation of water hyacinth biomass. *Bioresource Technology*, *255*(November 2017), 288–292. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.119>
- Ramírez Joyo, N. del C. (2017). Lombricultivo en la Producción de Abono Orgánico para Fomento de Valores Ambientales. *Universidad Pedagógica Experimental Libertador*, 276–288.
- Rathod, V. P., Bhale, P. V, Mehta, R. S., Harmani, K., Bilimoria, S., Mahida, A., & Champaneri, H. (2018). Biogas Production from Water Hyacinth in the Batch type Anaerobic Digester. *Materials Today: Proceedings*, *5*(11), 23346–23350.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.11.072>
- Regueiro, L., Veiga, P., Figueroa, M., Alonso-gutierrez, J., Stams, A. J. M., Lema, J. M., & Carballa, M. (2012). Relationship between microbial activity and microbial community structure in six full-scale anaerobic digesters. *Microbiological Research*, *167*(10), 581–589.
<https://doi.org/10.1016/j.micres.2012.06.002>

- Solarte Toro, J. C., Mariscal Moreno, J. P., & Aristizábal Zuluaga, B. H. (2017). Evaluación de la digestión y co-digestión anaerobia de residuos de comida y de poda en bioreactores a escala laboratorio. *Revista Ion, Investigación, Optimización y Nuevos Procesos En Ingeniería*, 25(1), 105–116. <https://doi.org/10.18273/revion.v30n1-2017008>
- Stratta, J. (2000). BIOCOMBUSTIBLES : los aceites vegetales como constituyentes principales del biodiesel, 1–15.
- Sullivan, C. O., Rounsefell, B., Grinham, A., Clarke, W., & Udy, J. (2010). Anaerobic digestion of harvested aquatic weeds : water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) , cabomba (*Cabomba Caroliniana*) and salvinia (*Salvinia molesta*). *Ecological Engineering*, 36(10), 1459–1468. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.06.027>

ANEXOS

Anexo 1. Caracterización fisicoquímica

DQO	No Datos	1	2	3	4	5	Promedio	Desv Estandar
JACINTO	5	6388	6298	5665	6478	6207	6207	319
PODA	5	1726	1748	1420	1605	1643	1628	130
COCIDOS	5	70135	63661	62890	63680	69813	66036	3611

DBO	No Datos	1	2	3	4	5	Promedio	Desv Estandar
JACINTO	5	940	1286	1136	1130	1179	1134	125
PODA	5	950	936	961	1001	970	964	24
COCIDOS	5	33132	33750	38625	34922	36000	35286	2167

FOSFORO TOTAL	No Datos	1	2	3	4	5	Promedio	Desv Estandar
JACINTO	5	32,8	32,4	32,4	31,3	32	32,2	0,567
PODA	5	11,5	9,4	9,65	6,56	7,86	8,99	1,88

Ac. Grasos	No Datos	1	2	3	4	5	Promedio	Desv Estandar
COCIDO	5	1721,1	1215,4	1877,8	1664,6	1315,4	1558.86	281.28
JACINTO	5	339,8	391,7	334,1	253,4	288	321.4	52.87
PODA	5	178,6	115,2	144	195,8	116,6	150.04	36.33

N. Total	No Datos	1	2	3	4	5	6	Promedio	Desv Estandar
COCIDO	5	593,6	436,8	620,2	658	547,4		571.20	85.24
JACINTO	6	305,2	344,4	250,6	329	267,4	308	300.77	35.79
PODA	4	73,206	54,6	74,2	65,8			66.95	9.05

N. Amoniacal	No Datos	1	2	3	4	5	Promedio	Desv Estandar
COCIDO	5	20,3	35,7	21,7	25,2	38,5	28.28	8.31
JACINTO	5	63,7	63,4	84,7	84	77	74.56	10.49
PODA	5	2,8	1,4	2,1	1,4	2,8	2.10	0.70

pH	No Datos	1	2	3	4	5	Promedio	Desv Estandar
COCIDO	5	5,12	4,68				4.90	0.31
JACINTO	5	4,92	5,75	6,61	4,18	4,1	5.11	1.07
PODA	5	5,56	5,98				5.77	0.30

Anexo 2. Calculo AME.

Fecha	Tiempo (d)	Temperatura (K)	Presión (atm)	V CH4 (ml)
27/11/2019 17:00	0,000	310	0,047	2,2402314
28/11/2019 8:25	0,642	310	0,053	2,5202604
28/11/2019 13:35	0,858	310	0,053	2,5194475
28/11/2019 17:04	1,003	310	0,037	1,7251753
29/11/2019 8:32	1,647	310	0,050	2,3794782
29/11/2019 13:36	1,858	310	0,054	2,5652766
29/11/2019 17:06	2,004	310	0,057	2,7069463
30/11/2019 8:41	2,653	310	0,074	3,5014913
30/11/2019 13:30	2,854	310	0,081	3,8270620
30/11/2019 17:20	3,014	310	0,089	4,1990792
1/12/2019 7:40	3,611	310	0,107	5,0356467
1/12/2019 13:43	3,863	310	0,115	5,4535262
1/12/2019 17:30	4,021	310	0,124	5,8844045
2/12/2019 8:43	4,655	310	0,154	7,2807522
2/12/2019 13:30	4,854	310	0,164	7,7524694
2/12/2019 17:00	5,000	310	0,172	8,1182198
3/12/2019 8:38	5,651	310	0,217	10,2743571
3/12/2019 13:30	5,854	310	0,230	10,8744568

3/12/2019 17:00	6,000	310	0,248	11,7107653
4/12/2019 9:08	6,672	310	0,300	14,1972934
4/12/2019 11:40	6,778	310	0,310	14,6453971
5/12/2019 8:51	7,660	310	0,419	19,8162024
5/12/2019 13:48	7,867	310	0,450	21,2753345
5/12/2019 17:00	8,000	309	0,457	21,6578117
6/12/2019 8:42	8,654	309	0,562	26,5989853
6/12/2019 1:34	8,357	310	0,592	28,0300232
6/12/2019 16:40	8,986	310	0,626	29,5801800
7/12/2019 8:45	9,656	310	0,772	36,4735687
7/12/2019 13:20	9,847	309	0,808	38,3352628
7/12/2019 17:36	10,025	309	0,849	40,2283327
8/12/2019 8:29	10,645	310	0,868	41,0311956
8/12/2019 13:40	10,861	309	0,907	43,0020887
8/12/2019 17:11	11,008	310	1,043	49,2999515
9/12/2019 8:44	11,656	310	1,181	55,9018430
9/12/2019 13:45	11,865	310	1,228	58,0780693
9/12/2019 16:52	11,994	310	1,237	58,5360317
10/12/2019 8:35	12,649	310	1,309	61,8664333
10/12/2019 13:34	12,857	310	1,329	62,8259553
10/12/2019 17:11	13,008	310	1,346	63,6393778
11/12/2019 8:39	13,652	310	1,413	66,8767244
11/12/2019 13:53	13,870	310	1,434	67,7699428

11/12/2019 17:23	14,016	310	1,443	68,1897154
12/12/2019 8:41	14,653	310	1,496	70,7996608
12/12/2019 13:43	14,863	309	1,510	71,5690105
12/12/2019 17:16	15,011	310	1,520	71,8277439
13/12/2019 8:15	15,635	310	1,571	74,2530963
14/12/2019 8:31	16,647	310	1,628	76,9582971
14/12/2019 13:14	16,843	310	1,634	77,2381454
14/12/2019 18:04	17,044	310	1,666	78,7306700
15/12/2019 9:20	17,681	310	1,676	79,2481870
15/12/2019 13:22	17,849	309	1,685	79,8227510
15/12/2019 17:41	18,028	310	1,684	79,5702150
16/12/2019 14:20	18,889	310	1,720	81,3484040
17/12/2019 14:30	19,896	310	1,745	82,5684698
18/12/2019 14:23	20,891	310	1,762	83,3893189
19/12/2019 14:12	21,883	310	1,776	84,0629217
20/12/2019 14:30	22,896	310	1,790	84,7441033
21/12/2019 14:37	23,901	310	1,797	84,9339751
22/12/2019 14:14	24,885	310	1,798	84,9806165
23/12/2019 14:25	25,892	310	1,805	85,4448539
24/12/2019 14:49	26,909	310	1,809	85,6593840
25/12/2019 13:53	27,870	310	1,813	85,6802374
26/12/2019 14:41	28,903	310	1,815	85,7735202
27/12/2019 14:16	29,886	310	1,817	85,8391263

Anexo 3. Gráficas volumen experimental y teórico a condiciones estándar de las mezclas.

