



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE QUÍMICA

**“DISEÑO DE UN BIODIGESTOR ANAEROBIO DE
FLUJO SEMICONTINUO PARA LA OBTENCIÓN DE BIOGÁS
A PARTIR DE RESIDUOS DE HIGUERILLA Y EXCRETAS
BOVINAS”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO AMBIENTAL

PRESENTA

LAURA ELENA URBINA RIOS

DIRIGIDA POR

Dr. MIGUEL ANGEL RAMOS LÓPEZ

SANTIAGO DE QUERÉTARO, QUERÉTARO, 2024

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE QUÍMICA

**“DISEÑO DE UN BIODIGESTOR ANAEROBIO DE
FLUJO SEMICONTINUO PARA LA OBTENCIÓN DE
BIOGÁS A PARTIR DE RESIDUOS DE HIGUERILLA Y
EXCRETAS BOVINAS”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO AMBIENTAL

PRESENTA

LAURA ELENA URBINA RIOS

DIRIGIDA POR

Dr. MIGUEL ANGEL RAMOS LÓPEZ

SINODALES

Dr. MIGUEL ANGEL RAMOS LÓPEZ

DIRECTOR

M. en C. DIANA LAURA QUEZADA MORALES

SINODAL

Dr. JUAN CAMPOS GUILLÉN

SINODAL

Dr. VÍCTOR PÉREZ MORENO

SINODAL

AGRADECIMIENTOS

A lo largo de este camino, he contado con el apoyo y guía de personas que han sido esenciales para el desarrollo de esta tesis.

En primer lugar, agradezco profundamente al Dr. Miguel Angel Ramos López y a la M. en C. Diana Laura Quezada Morales, por su tiempo, paciencia y valiosas observaciones, que enriquecieron este trabajo y me impulsaron a dar siempre lo mejor de mí.

Al Laboratorio de Compuestos Naturales Insecticidas, gracias por abrirme las puertas y brindarme el espacio necesario para llevar a cabo mi investigación.

Mi más sincero agradecimiento también al Fondo de Proyectos Especiales de Rectoría (FOPER) 2023-2024 UAQ por financiar este proyecto y confiar en su impacto positivo hacia la sustentabilidad.

A mis profesores, quienes con su dedicación y compromiso no solo me compartieron conocimientos, sino también su pasión por la ciencia y el medio ambiente.

A mis padres, por su apoyo incondicional. Este logro es tan suyo como mío.

Finalmente, a mis amigos, por estar presentes siempre.

A todos ustedes, mi más profundo agradecimiento.

ÍNDICE GENERAL

	Página
AGRADECIMIENTOS	i
ÍNDICE DE CUADROS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
2.1. Residuos Orgánicos	3
2.2. Subproductos animales	3
2.3. Subproductos vegetales	5
2.3.1. <i>Ricinus communis</i> (Higuerilla)	6
2.4. Biogás	7
2.4.1. Composición del biogás	7
2.5. Reacciones químicas	8
2.6. Factores determinantes en la producción de biogás	9
2.6.1. Temperatura	9
2.6.2. pH	9
2.6.3. Relación C/N de las materias primas	9
2.6.4. Niveles de sólidos totales y sólidos volátiles	10
2.6.5. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	10
2.6.6. Demanda química de oxígeno (DQO)	11
2.6.7. Velocidad de carga orgánica	11
2.7. Co-digestión	11
2.8. Biorreactores	12
2.8.1. Tipos de reactores	13
2.8.2. Balance de materia y energía	16
2.8.3. Diseño, desarrollo e instrumentación de un biodigestor de flujo semicontinuo	20
2.9. Aplicaciones del biogás	21
3. HIPÓTESIS	22

4. OBJETIVOS	23
4.1. General	23
4.2. Específicos	23
5. METODOLOGÍA	24
5.1. Materiales	24
5.2. Reactivos	24
5.3. Métodos	24
5.3.1. Recolección de sustratos	24
5.3.2. Análisis fisicoquímicos de los sustratos	26
5.4. Diseño experimental	28
5.4.1. Digestión anaerobia <i>In vitro</i>	28
5.4.2. Diseño y desarrollo de biodigestor de flujo semicontinuo	29
6. RESULTADOS	34
6.1. Caracterización de sustratos	34
6.1.1. Sólidos totales, volátiles, fijos y contenido de humedad	34
6.1.2. Determinación de carbohidratos, demanda química de oxígeno y relación C/N	35
6.2. Producción de biogás <i>in vitro</i>	36
6.3. Diseño del biodigestor	40
7. DISCUSIÓN	44
8. CONCLUSIONES	50
9. BIBLIOGRAFÍA	52

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
1. Composición estiércol tomado (Arellano y col., 2014)	4
2. Rendimiento de biogás y metano obtenido (Deng y col., 2020)	5
3. Información taxonómica <i>Ricinus communis</i> (Lifeder, 2020)	6
4. Composición del biogás (Varnero & María, 2011)	8
5. Condiciones ideales para un biodigestor anaeróbico semicontinuo (Kumar & Tuohy, 2018)	20
6. Acrónimos para muestras	29
7. Lista de materiales para la construcción de un biodigestor de flujo semicontinuo	32
8. Lista de material para la construcción de un sistema de limpieza de biogás	33
9. Lista de material para la construcción de almacén de biogás	33
10. Determinación de ST, SV y SF previo a la co-digestión	34
11. Determinación de ST y SV de co-digestiones	34
12. Determinación de carbohidratos, DQO y relación C/N previo a co-digestión	36
13. Determinación de carbohidratos y DQO para co-digestiones	36

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Diagrama de biorreactor (Khanal et al., 2017)	12
2. Reactor por lotes (Hayes & Mmbaga, 2013)	14
3. Reactor de flujo continuo (Hayes & Mmbaga, 2013)	15
4. Reactor de flujo semicontinuo (Hayes & Mmbaga, 2013)	16
5. Ejemplo diagrama de flujo para balance (Monsalvo y col., 2014)	17
6. Digestión anaerobia (Scheper & Ahring, 2003)	18
7. Corral de vacas en Ezequiel Montes, Querétaro (Fuente propia)	25
8. Higuera seca (Fuente propia)	25
9. Bagazo de higuera (Fuente propia)	26
10. Partes aéreas de higuera (Fuente propia)	26
11. Diagrama de biodigestor, trampas y almacén (Fuente propia)	31
12. Biodigestor (Fuente propia)	31
13. Trampas para biogás (Fuente propia)	31
14. Almacén de biogás (Fuente propia)	32
15. Rendimiento de biogás a temperatura ambiente	37
16. Volumen acumulado a temperatura ambiente	38
17. Rendimiento a 37 °C	39
18. Volumen acumulado a 37 °C	39
19. Parte frontal de Biodigestor (Fuente propia)	40
20. Parte lateral de Biodigestor (Fuente propia)	41
21. Biodigestor, trampas y almacén (Fuente propia)	41
22. Montaje de biodigestor (Fuente propia)	42
23. Biodigestor montado (Fuente propia)	43
24. Trampas para biogás montadas (Fuente propia)	43

RESUMEN

La producción de biogás se generó mediante digestión anaerobia (DA), un proceso que requiere condiciones específicas como la ausencia de oxígeno y una carga orgánica, logradas dentro de un biodigestor. En este trabajo, se diseñó un biodigestor de flujo semicontinuo capaz de abastecer a una vivienda, usando residuos de Higuierilla (*Ricinus communis*) en co-digestión con excretas bovinas; estas últimas, ricas en materia orgánica, ajustaron el contenido de humedad y pH e incrementaron los microorganismos necesarios para la degradación, mientras que los residuos de higuierilla, con aceites, celulosa y grasas, mejoraron la producción de biogás. Se ajustaron cuidadosamente parámetros como la relación C/N, el pH y la carga orgánica basada en los sólidos totales (ST). Los resultados mostraron que el control positivo (C+HB) presentó un bajo rendimiento inicial, aumentando significativamente después del día 25 hasta alcanzar 120 mL/gSV al día 96. Por otro lado, en la co-digestión con bagazo y excretas bovinas (B/HB), el rendimiento en el cuarto día fue mayor (10 mL/gSV), alcanzando 40 mL/gSV al día 96, mientras que la co-digestión con excretas bovinas y partes aéreas (PA/HB) resultó en el mejor rendimiento, comenzando los primeros 4 días con 13 mL/gSV y llegando a 68 mL/gSV al día 96. Así, todos los sustratos mostraron un aumento continuo en la producción de biogás, destacando la co-digestión PA/HB a temperatura ambiente como la de mayor rendimiento, seguida por B/HB y C+HB. Asimismo, la co-digestión de excretas bovinas con partes aéreas incrementó la producción de biogás en un 454 % durante los primeros 10 días, estabilizándose luego por la adaptación bacteriana, mientras que el C+HB alcanzó rendimientos similares hasta el día 62, demostrando que la combinación de sustratos aumenta el rendimiento de biogás en comparación con el uso de un solo sustrato. El diseño del biodigestor siguió parámetros críticos, como la relación C/N y el pH, ajustados mediante análisis previos, y tanto el volumen como la estructura del biodigestor se determinaron considerando el tiempo de retención hidráulica y las propiedades del sustrato, fomentando un entorno controlado que promueve el desarrollo de bacterias anaerobias. Este biorreactor incluye un sistema de limpieza; este sistema está constituido por 4 fases, la primera formada por agua que tiene la función de diluir partículas y siloxanos, la segunda formada por carbón activado se utiliza para la absorción de dióxido de carbono (CO₂), el tercer filtro que contiene sílica gel remueve la fracción de agua de vapor y por último para la retención de ácido sulfhídrico (H₂S) un que filtro contiene óxido de zinc (ZnO), además de incorporar un contenedor de 120 L para facilitar su almacenamiento y manejo.

1. INTRODUCCIÓN

Las energías convencionales, como los combustibles fósiles, han sido la principal fuente de energía durante décadas, impulsando el desarrollo económico y tecnológico a nivel global. Sin embargo, su uso ha traído consigo graves consecuencias ambientales y sociales. La extracción, transporte y consumo de combustibles fósiles, como el petróleo, el gas natural y el carbón, generan grandes cantidades de gases de efecto invernadero (GEI) como el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O). Estos gases, al acumularse en la atmósfera, retienen el calor, provocando un aumento de la temperatura global y desencadenando eventos climáticos extremos, como sequías, huracanes y olas de calor, que afectan la biodiversidad y ponen en riesgo la seguridad alimentaria y el bienestar humano. Además, estos combustibles generan otros contaminantes que afectan directamente la calidad del aire, el agua y el suelo, incrementando enfermedades respiratorias, cardiovasculares y, en casos extremos, provocando la muerte.

Otro aspecto crítico de los combustibles fósiles es su carácter finito. Al depender de recursos no renovables, su extracción y precio están sujetos a volatilidad, lo cual genera incertidumbre económica en los países que dependen fuertemente de su importación. Esto demuestra la urgencia de una transición energética hacia fuentes de energía limpias, renovables y accesibles, que no sólo reduzcan la dependencia de los combustibles fósiles, sino que también minimicen el impacto ambiental y contribuyan a la mitigación del cambio climático.

Entre las fuentes alternativas de energía, el biogás sobresale como una opción sostenible y viable. Este gas se genera mediante digestión anaerobia (DA) de materia orgánica, un proceso biológico que descompone residuos como los agrícolas, alimenticios y excretas en ausencia de oxígeno. Este proceso de conversión transforma residuos en energía aprovechable y evita la emisión directa de metano, un potente gas de efecto invernadero, a la atmósfera. Además, el subproducto de la

DA, llamado digestato, es un fertilizante natural rico en nutrientes, ideal para enriquecer suelos agrícolas y fomentar la economía circular.

Para que la DA funcione de manera óptima, se requiere un ambiente específico donde las bacterias puedan desarrollarse adecuadamente. Por eso, el diseño de un biodigestor eficiente implica una serie de componentes y características que mejoran tanto el proceso de biodigestión como la calidad y almacenamiento del biogás. Es fundamental que el biodigestor mantenga condiciones óptimas para las bacterias que descomponen la materia orgánica, controlando variables críticas como el pH y la mezcla de sustratos. Entre los distintos tipos de biodigestores, el de flujo semicontinuo es particularmente eficiente, ya que permite una carga constante de sustrato fresco y la extracción regular de digestato, asegurando un proceso estable y una fuente constante de nutrientes. El cuerpo principal del biodigestor es una cámara de digestión, generalmente fabricada con materiales resistentes a la corrosión y al desgaste. Un elemento adicional clave en el diseño del biodigestor es el sistema de agitación, que puede ser mecánico o hidráulico. Este sistema mantiene los sustratos en movimiento dentro de la cámara, previniendo la formación de capas sólidas en el fondo del tanque y favoreciendo el contacto entre las bacterias y la materia orgánica, aumentando la eficiencia de producción de biogás.

Uno de los componentes externos es el sistema de filtración, que elimina impurezas y componentes no deseados del biogás como el sulfuro de hidrógeno (H_2S), dióxido de carbono (CO_2) y el vapor de agua. Las trampas, generalmente de carbón activado o de hierro, purifican el biogás, mejorando su calidad y reduciendo los daños potenciales a los equipos de almacenamiento o uso.

En cuanto al almacenamiento incluye sistemas de seguridad que regulen la presión y liberen gas en caso de sobrepresión. Esto permite mantener un control sobre el uso y destino del biogás. Por último, el biodigestor incluye un sistema de salida para el digestato, el subproducto de la digestión anaerobia.

2. ANTECEDENTES

2.1. Residuos Orgánicos

La Ley General para la Gestión y Prevención Integral de Residuos (LGPGIR) define a los residuos orgánicos como “Todo desecho de origen biológico que alguna vez estuvo vivo o fue parte de un ser vivo”. La Ley General para la Gestión y Prevención Integral de Residuos (LGPGIR) define a los residuos orgánicos como “Todo desecho de origen biológico que alguna vez estuvo vivo o fue parte de un ser vivo” (Secretaría General, 2023).

Para la producción de biogás se utiliza una gran variedad de desechos y residuos orgánicos, en general, relacionadas con el uso del suelo y la zonificación, como: residenciales, comerciales, municipales, industriales, de áreas libres, de plantas de tratamiento de aguas residuales y residuos agrícolas (Wilken y col., 2019). Todos estos residuos pasan por un proceso de degradación conocido como compostaje, el cual se define como la descomposición y estabilización biológica de sustratos orgánicos en condiciones que permiten el desarrollo de temperaturas termófilas como resultado de una fase activa biológicamente, con un producto final suficientemente estable para el almacenamiento y aplicación a la tierra sin efectos ambientales adversos. Este producto final incluye carbono (C), nitrógeno (N), fósforo (P), materia orgánica y otros elementos. La degradación puede suceder por digestión aerobia y anaerobia, siendo esta última la única que produce biogás. La composición y producción de este, depende de la materia prima, la carga orgánica, temperatura y tiempo de degradación (Polprasert, 2007).

2.2. Subproductos animales

Los subproductos animales hacen referencia a todos los desechos provenientes de estos, como su excremento y restos de sus cuerpos. Se conoce como estiércol al excremento proveniente de ganado mamífero, pero el resto de los animales, incluidos

los humanos, también producimos excremento. En el Cuadro 1 se muestra la proporción de cada uno de los elementos que lo constituyen (Arellano y col., 2014).

La cantidad y composición del estiércol por unidad de tiempo varía dependiendo de factores, como el peso vivo total, la especie, el tamaño, la edad, la ingesta de alimento y agua, el clima, las prácticas de manejo, entre otros (Polprasert, 2007).

Cuadro 1. Composición estiércol tomado (Arellano y col., 2014)

Compuesto	Vacunos (%)	Porcinos (%)	Caprinos (%)	Cunícola (%)	Humanos (%)	Gallinaza (%)
Materia orgánica	48.9	43.3	52.8	63.9	88-97	54.1
Nitrógeno total	1.3	1.4	1.5	1.9	5-7	2.4
Fósforo asimilable (P₂O₅)	0.8	2	2.9	1.8	3-5.4	3.9
Potasio (K₂O)	0.8	0.7	0.7	0.9	1-2.5	1.4
Calcio (Ca²⁺)	2.1	2.7	3.2	2.4	4-5	3.4
Magnesio (Mg²⁺)	0.5	0.6	0.6	0.4	2-3	0.8

El estiércol animal presenta ventajas como materia prima para la producción de biogás por las siguientes razones:

- La relación C/N (carbono-nitrógeno) suele estar entre 15 y 30, lo que favorece el crecimiento de microorganismos anaerobios.
- Existe suficiente capacidad amortiguadora frente a acidificaciones menores.
- Algunos tipos de estiércol animal (ej. estiércol de vaca) contiene microorganismos del rumen que son suplementos útiles para los microbios anaeróbicos en los digestores.

Los estiércoles animales tienen diferentes propiedades físicas y químicas que determinan el rendimiento operativo de una planta de biogás, los más comunes se muestran en el Cuadro 2 (Deng y col., 2020).

Cuadro 2. Rendimiento de biogás y metano obtenido (Deng y col., 2020)

Sustrato	ST (%)	ST/SV (%)	C/N	Rendimiento del biogás			Rendimiento de metano	
				m ³ /kg FM	m ³ /kg ST	m ³ /kg SV	m ³ /kg FM	m ³ /kg SV
Porcino	20 - 25	77 - 84	13 - 15		0.25 - 0.35			
Bovino	16 - 18	70 - 75	17 - 26	0.06 - 0.12	0.18 - 0.25		0.03 - 0.04	0.13 - 0.33
Caprino	30 - 32	65 - 70	26 - 29		0.21 - 0.27			
Gallinaza	29 - 31	80 - 82	9 - 11		0.32 - 0.37			
Estiércol de pato	16 - 18	80 - 82	9 - 15		0.36 - 0.44			
Estiércol de conejo	10 - 37	66 - 70	14 - 20		0.17 - 0.21			

ST – Sólidos totales
SV – Sólidos volátiles
FM – Estiércol fresco

2.3. Subproductos vegetales

Los residuos vegetales y productos derivados de cultivos agrícolas (biomasa), tienen un importante potencial para producir energía sustentable. La agricultura es uno de los mayores sectores biológicos con mayor producción de biomasa, produciendo una media de 23.7 millones de tn de alimentos al día en todo el mundo (Duque-Acevedo y col., 2020).

Los alimentos y los desperdicios vegetales comprenden más del 50 % de los desechos en los países en vías de desarrollo. La mayoría de los desechos orgánicos industriales se pueden utilizar como materia prima para la producción de biocombustibles. La biomasa de los cultivos generalmente consta de tres partes: grano, tallo, hojas y raíz. Su proporción se puede obtener determinando la masa de cada una de ellas (Deng y col., 2020).

La sequía es el principal factor que limita la productividad agrícola en todo el mundo, y los cultivos con mayor resistencia a este estrés parecen ser cruciales para mantener los rendimientos en áreas donde las estaciones secas son comunes.

Ricinus communis, también conocido como ricino o higuierilla, es un cultivo con creciente importancia económica, debido a su uso en la industria química y farmacéutica y, principalmente, para la producción de biodiésel (Maheshwari & Kovalchuk, 2016).

2.3.1. *Ricinus communis* (Higuierilla)

Ricinus communis es una planta herbácea que pertenece a la familia Euphorbiaceae (Cuadro 2). Es una planta tóxica por ser productora de una lectina venenosa, la ricina, originaria de Europa y que se desarrolla ampliamente en las regiones tropicales (Lifeder, 2020). Es una especie monotípica que contiene hasta un 60 % de aceite, siendo el ácido graso más abundante el ácido ricinoleico (ácido 12-C hidroxioleico) con hasta el 90 %. Algunas características especiales de este ácido son un alto peso molecular, un bajo punto de fusión (5 °C), un punto de solidificación muy bajo (-12 °C a -18 °C) y la viscosidad más alta y estable, hacen que sea extremadamente útil para fines industriales. Sin embargo, su manipulación ha enfrentado desafíos porque estas especies de plantas son muy recalcitrantes a la transformación (Maheshwari & Kovalchuk, 2016). Otros ácidos grasos presentes en el aceite son: ácido linoleico con 3 a 6 %, ácido oleico con 2 a 4 % y ácidos grasos saturados con 1 a 5 % (Scholz & da Silva, 2008). Además del contenido de aceite, la semilla de higuierilla contiene compuestos nutricionales como proteínas, carbohidratos y minerales diversos (Audi y col., 2005).

Cuadro 3. Información taxonómica *Ricinus communis* (Lifeder, 2020)

Dominio	Eucarya
Reino	Plantae
Phylum	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Orden	Malpighiales
Familia	Euphorbiaceae
Genero	<i>Ricinus</i>
Especie	<i>R. communis</i>

2.4. Biogás

El biogás se compone principalmente de metano y dióxido de carbono, pero también contiene impurezas como ácido sulfúrico y amoníaco (Deublein & Steinhauser, 2011). La composición de este depende del material digerido y de la eficiencia del proceso. Cuando tiene un contenido de metano superior al 45 % es inflamable (Varnero & María, 2011). Los desechos orgánicos pueden convertirse bioquímicamente en biocombustibles, como el biogás y el etanol, que pueden usarse para calefacción o como combustible para motores de combustión y cogeneradores para la generación de electricidad y calor (Polprasert, 2007).

De acuerdo con Deublein & Steinhauser (2011), todos los tipos de biomasa pueden utilizarse como sustratos para la producción de biogás, siempre que contenga proteínas, grasas, y carbohidratos como celulosa y hemicelulosa como componentes principales. Es importante que se tengan en cuenta los siguientes puntos a la hora de seleccionar la biomasa:

- El contenido de sustancia orgánica debe ser apropiado para el proceso de fermentación seleccionado.
- El valor en elementos como carbono y nitrógeno de la biomasa que intervengan en la formación de gases.
- El contenido de sustancias tóxicas como metales pesados y agentes extraños como piedras debe ser bajo para permitir que el proceso de fermentación se lleve a cabo sin problemas.
- La composición del biogás debe ser adecuada para aplicaciones posteriores.
- La composición del residuo de la fermentación debe ser tal que pueda utilizarse, por ejemplo, como fertilizante.

2.4.1. Composición del biogás

La composición del biogás se describe en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Composición del biogás (Varnero & María, 2011)

Compuesto	Contenido (%)
Metano (CH₄)	55 - 70
Dióxido de carbono (CO₂)	30 - 45
Ácido sulfhídrico (H₂S)	0 - 0.5
Amoniaco (NH₃)	0 - 0.5
Vapor de agua (H₂O)	1 - 5
Nitrógeno (N₂)	0 - 5

2.5. Reacciones químicas

La fermentación del metano es un proceso complejo, que se puede dividir en cuatro fases de degradación: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Deublein & Steinhauser, 2011). En la etapa de hidrólisis, los compuestos macromoleculares insolubles, como los carbohidratos, las grasas y las proteínas, deben hidrolizarse en compuestos solubles, como el azúcar soluble, los ácidos grasos, la glicerina y los aminoácidos, mediante la catálisis de enzimas extracelulares. Las bacterias promueven la hidrólisis en la etapa de acetogénesis (es decir, descomponen los polímeros en monómeros) y las bacterias fermentativas transforman a los monómeros resultantes en una amplia gama de productos finales. Los productos finales de esta etapa incluyen ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono. Por otra parte, el papel de las bacterias acetogénicas es crucial para el proceso anaeróbico general, ya que convierten los intermediarios fermentativos en sustratos metanogénicos, hidrógeno, dióxido de carbono, ácidos acéticos y compuestos monocarbonados. La producción de metano tiene lugar en la última etapa de la digestión anaerobia (DA), que es catalizada por metanógenos hidrogenotróficos, acetotróficos y metilotróficos (Deng et al., 2020; Murphy & Thamsiriroj, 2013).

2.6. Factores determinantes en la producción de biogás

2.6.1. Temperatura

La temperatura es un factor importante que puede influir notablemente en el crecimiento y metabolismo de los microorganismos. Durante la digestión anaeróbica, diferentes categorías de microorganismos favorecen diferentes temperaturas. Para las bacterias acidogénicas, la temperatura óptima es de 25 a 35 °C; para los metanógenos, la temperatura óptima para las bacterias es de 32 a 42 °C y la de las bacterias termófilas es de 48 a 55 °C (R. Zhang & El Mashad, 2020).

2.6.2. pH

El pH es un parámetro importante que influye en el crecimiento y el metabolismo de los microorganismos. Las bacterias acidogénicas pueden crecer con un pH de 4.5 a 8.0. Para los metanógenos, el pH óptimo es de 6.7 a 7.5, que está cerca de la neutralidad. Un pH adecuado es necesario para el crecimiento de microorganismos, ya que cuando no está dentro de este rango, se inhibe la producción del biogás (Deng y col., 2020).

2.6.3. Relación C/N de las materias primas

El carbono y el nitrógeno son las principales fuentes de alimentación de las bacterias metanogénicas. El carbono constituye la fuente de energía y el nitrógeno es utilizado para la formación de nuevas células. Estas bacterias consumen 30 veces más carbono que nitrógeno, por lo que la relación óptima de estos dos elementos en la materia prima se considera en un rango de 20:1 hasta 30:1. La descomposición de materiales con alto contenido de carbono, superior a 35:1, ocurre más lentamente, porque la multiplicación y desarrollo de bacterias es bajo, por la falta de nitrógeno, pero el período de producción de biogás es más prolongado. En cambio, con una relación C/N menor de 8:1 se inhibe la actividad bacteriana debido a la formación de

un excesivo contenido de amonio, el cual en grandes cantidades es tóxico e inhibe el proceso (Varnero & María, 2011).

2.6.4. Niveles de sólidos totales y sólidos volátiles

Toda la materia orgánica está compuesta de agua y una fracción sólida llamada sólidos totales (ST). La movilidad de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato se ve crecientemente limitada a medida que se aumenta el contenido de sólidos y, por lo tanto, puede verse afectada la eficiencia y producción de gas. Se ha demostrado experimentalmente que una carga en digestores semicontinuos no debe tener más de un 8 % a 12 % de sólidos totales para asegurar el buen funcionamiento del proceso, a diferencia de los digestores discontinuos, que tienen entre un 40 a 60 % de sólidos totales (Varnero & María, 2011).

La digestión anaeróbica completa toma alrededor de 16 semanas a temperaturas entre 25 y 35 °C. La producción de gas se puede acelerar y hacer más consistente alimentando continuamente el digestor con pequeñas cantidades de desechos diariamente. Esto también preservará el nivel de nitrógeno en la suspensión para su uso como biofertilizante. La ventaja de los reactores de alimentación continua es que las bacterias reciben un suministro regular de sustrato y, por lo tanto, pueden generar un suministro más constante de biogás (Raja & Wazir, 2017).

2.6.5. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

Se refiere a la cantidad de oxígeno consumido por la oxidación de la materia prima en condiciones de calentamiento con oxidantes químicos, generalmente expresado en términos de consumo de oxígeno en mg/L o g/L. El oxidante más utilizado es el dicromato de potasio o permanganato de potasio. La DBO representa la cantidad de sustancias orgánicas que pueden oxidarse químicamente y una pequeña cantidad de sustancias inorgánicas en la materia prima, así como la energía química máxima en la materia prima (Deng y col., 2020).

2.6.6. Demanda química de oxígeno (DQO)

Es una medida indicativa de la cantidad de oxígeno que pueden consumir las reacciones en una solución medida (Merino, 2019), este describe la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar completamente una muestra de desechos en condiciones aeróbicas y se calcula experimentalmente midiendo la cantidad de un agente químico oxidante necesario para oxidar completamente una muestra de desechos. La demanda química de oxígeno (DQO) se utiliza para medir la cantidad de oxígeno presente en la materia orgánica de una muestra que es susceptible de ser oxidada por un oxidante químico fuerte (Angelidaki & Sanders, 2004).

2.6.7. Velocidad de carga orgánica

Es la cantidad de materia orgánica introducida por unidad de volumen y tiempo. Valores bajos implican baja concentración en el influente y/o elevado tiempo de retención. El incremento de esta implica una reducción en la producción de gas por unidad de materia orgánica introducida, debiendo encontrar un valor óptimo técnico/económico para cada instalación y residuo a tratar (Instituto de Diversificación y Ahorro de la Energía, 2007).

2.7. Co-digestión

La co-digestión es un método de tratamiento de desechos en el que diferentes residuos se mezclan y tratan juntos (Khalid y col., 2011). Las ventajas de la co-digestión son: mejorar el rendimiento de metano, suministra elementos que promueven la producción del biogás, reduce el potencial tóxico de compuestos, ajusta el contenido de humedad y pH, e incrementa el contenido de microorganismos que participan en los procesos de degradación (Teniza y col., 2015).

La implementación de la co-digestión ofrece varias ventajas ecológicas, tecnológicas y económicas, ya que puede aumentar la producción de CH₄ en los digestores de estiércol entre 50 y 200 %, según las condiciones de funcionamiento y los cosustratos utilizados (Álvarez y col., 2010).

2.8. Biorreactores

De acuerdo con Worstell (2015), las reacciones químicas requieren tiempo para ocurrir, energía o liberación de esta, y un mecanismo para mezclar los reactivos. Estos requisitos se cumplen mediante el diseño de recipientes llamados reactores químicos, los cuales proporcionan:

- Tiempo de residencia o tiempo de contacto;
- Intercambio de energía/calor;
- Agitación

Por lo que, un biorreactor (Figura 1) para la producción de biogás, es una unidad donde los microorganismos metanogénicos digieren materia orgánica en condiciones anaeróbicas, en este lugar se llevan a cabo de forma continua o periódica los procesos de hidrólisis de biomasa, fermentación y producción de metano. Por lo general se trabajan en una carga hasta del 80 %. Para reducir la pérdida de calor, la carcasa del reactor debe estar debidamente aislada, para ello se utilizan acero, hormigón armado, polietileno, madera y arcilla. Su funcionamiento se caracteriza por tres parámetros básicos: temperatura, carga y duración de la retención del sustrato (Baltrenas & Baltrenaite, 2018).

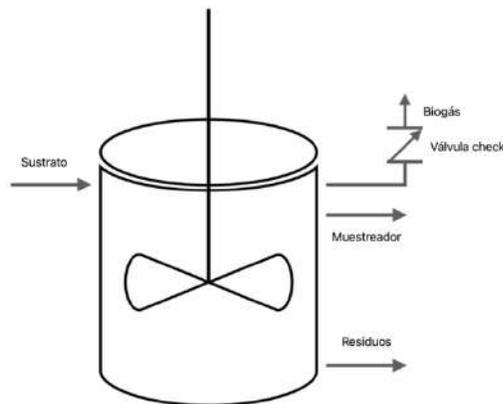


Figura 1. Diagrama de biorreactor (Khanal et al., 2017)

Tauseef y col. (2013), describe las partes de un biorreactor de la siguiente manera:

- Digestor: La mezcla homogénea de biomasa se fermenta dentro del digestor, donde se produce biogás a través de la acción bacteriana.
- Tubería de entrada: El sustrato se descarga en el digestor a través de esta.
- Tubería de salida: El residuo digerido se descarga en el tanque de salida, ya sea a través de la tubería de salida o por alguna otra abertura provista en el digestor.
- Gasoducto: El gasoducto lleva el gas hasta el punto de utilización, como una estufa o una lámpara.
- Válvulas de no retorno (Check): Su propósito es prevenir el flujo inverso que se forma al detener bruscamente el flujo.
- Muestreador: Salida de flujo que permite analizar el producto.

2.8.1. Tipos de reactores

Los reactores químicos tienen muchos diseños y configuraciones. La presencia de corrientes de flujo durante la reacción es un criterio importante para su clasificación y se dividen en:

- Por lotes (Batch)
- Flujo continuo
- Flujo semicontinuo (Semi-Batch)

La mayoría de los reactores industriales funcionan en modo continuo en lugar de por lotes, porque los reactores continuos generan una mayor cantidad de productos con equipos más pequeños, lo que se ve reflejado en una disminución de mano de obra y mantenimiento, lo que permite un mejor control de calidad (Liu, 2020).

2.8.1.1. Por lotes (Batch)

En un reactor por lotes, también conocido como discontinuo o tipo batch, no existe flujo y solo se alimenta una vez (Figura 2). En funcionamiento, el reactor se carga con biomasa, continúa la reacción y cuando finaliza, se vacía. Estos reactores pueden tener un volumen fijo. Se utilizan para una variedad de operaciones de proceso, como disolución sólida, mezcla de productos, reacciones químicas,

cristalización, extracción líquido/líquido y polimerización. En algunos casos, no se denominan reactores, sino que su nombre refleja la función que desempeña (como cristalizador o biodigestor). Este tipo de reactor es útil cuando:

- Se trata de producción en pequeñas cantidades,
- Se maneja un sustrato/producto de alto valor
- Se tienen múltiples productos/sustratos/procesos bajo demanda (Liu, 2020).

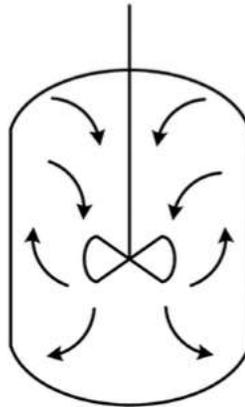


Figura 2. Reactor por lotes (Hayes & Mmbaga, 2013)

2.8.1.2. Flujo continuo

Los reactores continuos tienen corrientes de entrada y salida (Figura 3). Al igual que los reactores discontinuos, pueden ser homogéneos o heterogéneos. A menudo funcionan en estado estacionario, es decir, la tasa de flujo másico que ingresa al reactor es igual a la que sale, y tanto la temperatura como la concentración, en todos los puntos no cambian con el tiempo (Hayes & Mmbaga, 2013). En este tipo de reactores, inicialmente, una cantidad de material se hace reaccionar sin realizar una adición o eliminación hasta que la reacción se estabilice, para posteriormente permitir el flujo constante de entrada y salida. Se utiliza en los siguientes casos:

- Para la producción a gran escala.
- Cuando se tiene un suministro constante de sustrato y demanda de calidad del producto.

- Cuando se tiene un catalizador estable o controlable a través de la alimentación (Liu, 2020).

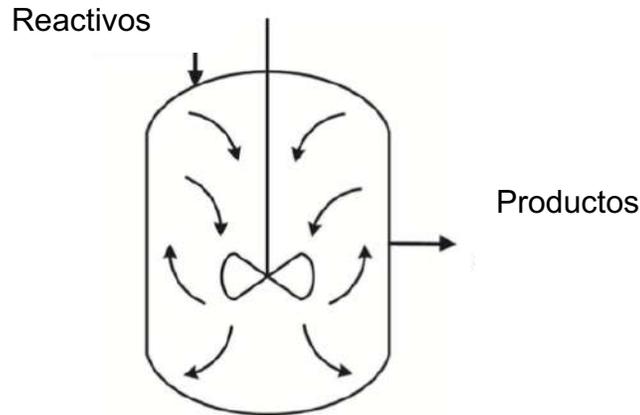


Figura 3. Reactor de flujo continuo (Hayes & Mmbaga, 2013)

2.8.1.3. Flujo semicontinuo

Este reactor puede contener inicialmente una cantidad de biomasa, y durante la reacción agregar o eliminar material que promueva la reacción. Una vez que se detiene la adición, puede continuar operando como discontinuo (Figura 4). El reactor semicontinuo es transitorio y no puede operar en estado estacionario, generalmente usado cuando:

- Una operación flexible.
- No se cuenta con un ingreso constante de biomasa.
- Se tiene un catalizador inestable con una larga duración en su operación (Hayes & Mmbaga, 2013; Liu, 2020).

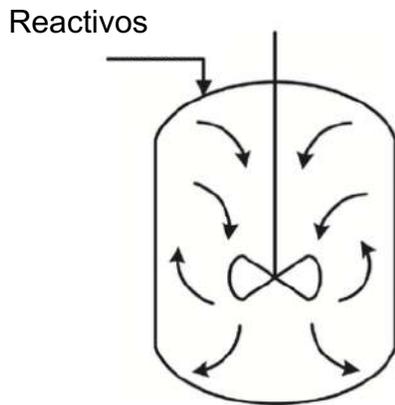


Figura 4. Reactor de flujo semicontinuo (Hayes & Mmbaga, 2013)

Cuando se trata de digestiones anaerobias es necesario inyectar gases para garantizar la ausencia de aire que aporte oxígeno a las reacciones, estos gases pueden ser CO_2 o una recirculación del biogás producido (Kumar & Tuohy, 2018a).

2.8.2. Balance de materia y energía

El principio de conservación de la materia establece que la cantidad total de masa que entra en un sistema debe ser igual a la cantidad total de masa que sale, más cualquier cambio en la materia almacenada. Del mismo modo, la energía que entra es igual a la energía que sale (Moran, 2019).

De acuerdo con Monsalvo y col. (2014), la contabilidad completa de la masa y la energía en estos procesos químicos se conoce como balance de materia y energía, la cual, en la práctica de la química y la administración de procesos industriales, se identifica con frecuencia como balance de masa o balance de peso. Un balance de materia puede llevarse a cabo sin un balance de energía, pero un balance de energía requiere conocer la masa y la composición de todas las corrientes. Se sugiere que al llevar a cabo un balance de materia y energía es útil y conveniente efectuar los siguientes pasos:

1. Trazar un diagrama de flujo simplificado del proceso (Figura 5):

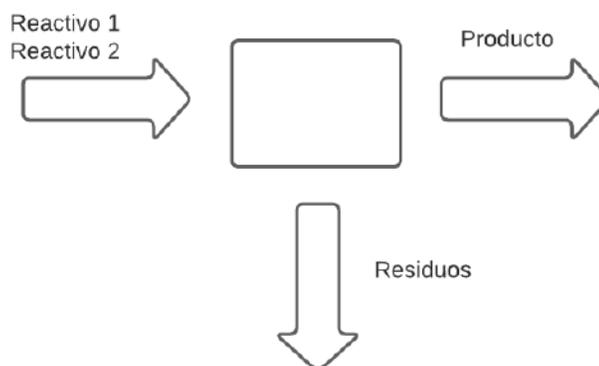


Figura 5. Ejemplo diagrama de flujo para balance (Monsalvo y col., 2014)

2. Colocar en el diagrama todos los datos disponibles utilizando las unidades del Sistema Internacional.
3. Establecer las ecuaciones para las reacciones químicas que ocurren en el proceso.

En forma general, el balance en una reacción química está dado por:

$$\textit{masa de entrada} = \textit{masa de salida}$$

Donde:

$$\textit{masa de salida} = MRP + MR + MA$$

MRP es la masa real de los productos

MR es la masa de residuos

MA es la masa acumulada

En la mayoría de los reactores, el balance de energía es de suma importancia. La ecuación de conservación de la energía permite el cálculo de parámetros como, los cambios de temperatura que ocurren a medida que avanza la reacción e indica la cuánta energía se transfiere hacia o desde un sistema. En particular, se tiene interés en saber cuánta energía térmica se libera o absorbe para una composición de alimentación dada y la temperatura resultante de la corriente del proceso. La temperatura de la corriente de reacción determina, entre otras cosas, la velocidad de

reacción. La ecuación general de balance de energía para un sistema es (Hayes & Mmbaga, 2013):

$$[TFEES] - [TFESS] = [TEAS]$$

Donde:

TFEES es la tasa de flujo de energía que entra sistema

TFESS es la tasa de flujo de energía que sale del sistema

TEAS es la tasa de energía acumulada en el sistema

Para la DA, el balance de materia y energía va a involucrar a todas las reacciones que se lleven a cabo durante el proceso (Figura 6) (Scheper & Ahring, 2003):

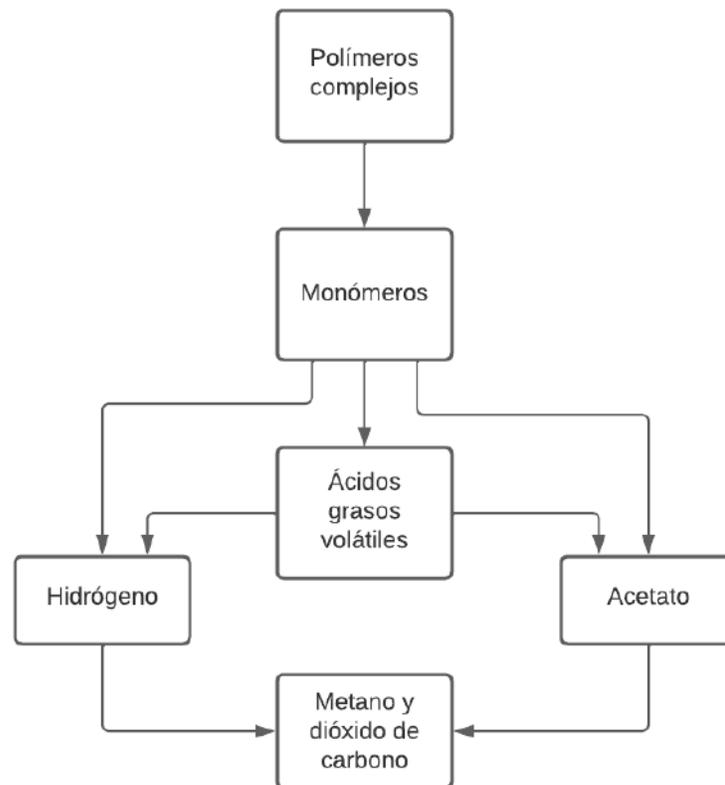


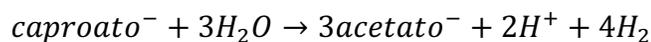
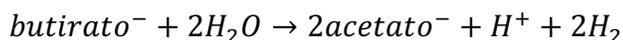
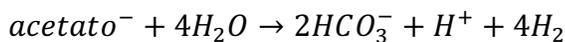
Figura 6. Digestión anaerobia (Scheper & Ahring, 2003)

Este proceso descrito por (Stams, 1994) incluye las siguientes reacciones:

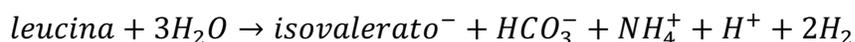
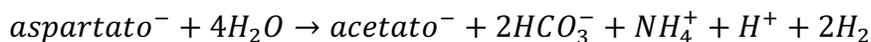
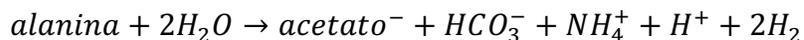
Etanol y lactato



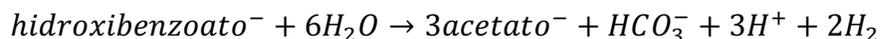
Ácidos grasos



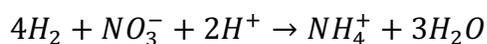
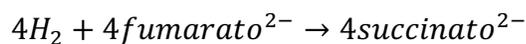
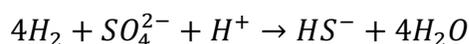
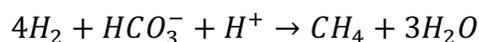
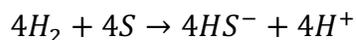
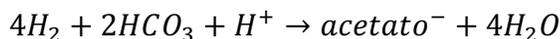
Aminoácidos



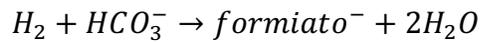
Compuestos aromáticos



Reacciones hidrogenotróficas



Interconversión formiato-hidrógeno



2.8.3. Diseño, desarrollo e instrumentación de un biodigestor de flujo semicontinuo

La influencia de los parámetros para la producción de biogás (Cuadro 5) y las características de cada tipo de reactor, permiten establecer que, para el diseño del biodigestor, la opción adecuada es trabajar con el modelo de un reactor semicontinuo (Kumar & Tuohy, 2018).

Cuadro 5. Condiciones ideales para un biodigestor anaeróbico semicontinuo (Kumar & Tuohy, 2018)

Parámetro	Rango óptimo
Alcalinidad	1500-4000 mg CaCO ₃ /L
pH	6.8-7.2
SV/ST	45 %
C/N	20-30
Carga orgánica (COrg)	3-5 kg SV/m ³ d

Los parámetros ambientales que hay que controlar hacen referencia a condiciones que deben mantenerse o asegurarse para el desarrollo del proceso. Estos son:

- pH, que debe mantenerse cercano a la neutralidad.
- Alcalinidad, para evitar la acidificación. Es recomendable una alcalinidad superior a 1500 mg/L CaCO₃.
- Potencial redox, con valores recomendables inferiores a -350 mV.
- Nutrientes, con valores que aseguren el crecimiento de los microorganismos.
- Tóxicos e inhibidores, cuya concentración ha de ser la mínima posible.

2.9. Aplicaciones del biogás

De acuerdo con el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (Instituto de Diversificación y Ahorro de la Energía, 2007), el biogás generado durante la DA puede tener diferentes usos:

- En calderas para producir calor o electricidad.
- En un motor o turbina para generar electricidad.
- En celdas de combustible, previo a la limpieza de H₂S y otros contaminantes de membrana.
- Refinarlo y añadirle los aditivos necesarios para su incorporación a la red de transporte de gas natural.
- Utilizado como materia prima básica para la síntesis de productos de alto valor añadido como el metanol o el gas natural licuado.
- Combustible de automoción.

El biogás, además del metano, contiene otros compuestos que actúan como impurezas: sulfuro de hidrógeno, monóxido de carbono y compuestos orgánicos volátiles como hidrocarburos, halógenos y siloxanos. Por lo tanto, es necesario limpiar el combustible, dependiendo del uso final (Instituto de Diversificación y Ahorro de la Energía, 2007).

3. HIPÓTESIS

Los residuos de higuera co-digeridos con excretas bovinas constituyen la fuente de carbono y nitrógeno suficiente para aumentar hasta en un 50 % la velocidad de producción de biogás en un biodigestor de flujo semicontinuo de 220 L el cual es capaz de abastecer la demanda para cocción de alimentos en una casa-habitación de dos integrantes.

4. OBJETIVOS

4.1. General

- Diseñar un biodigestor de flujo semicontinuo para la obtención de biogás a partir de residuos de higuera en co-digestión con excretas bovinas.

4.2. Específicos

- Evaluar rendimiento en la co-digestión de excretas bovinas y residuos de higuera para la producción de biogás *in vitro*.
- Desarrollar un biodigestor de flujo semicontinuo.
- Escalar la producción de biogás a un biodigestor de flujo semicontinuo.

5. METODOLOGÍA

5.1. Materiales

- Vasos de precipitados
- Matracas de Erlenmeyer
- Pipetas
- Balanza
- Crisoles
- Espátulas
- Pinzas
- Viales
- Bureta
- Soporte universal
- Pinzas para bureta
- Guantes
- Horno
- Mufla
- Refrigerador

5.2. Reactivos

- Hidróxido de sodio (NaOH)
- Ácido clorhídrico (HCl)
- Ácido sulfúrico concentrado (H₂SO₄)
- Biftalato de potasio (C₈H₅KO₄)
- Dicromato de potasio (K₂Cr₂O₇)
- Fenol (C₆H₆O)

5.3. Métodos

5.3.1. Recolección de sustratos

Se realizaron dos colectas en el mismo sitio, la primera destinada a la experimentación *in vitro* a nivel laboratorio, correspondiente a 1 kg de excretas bovinas que fueron obtenidas en el municipio de Ezequiel Montes, Qro., México (20°65'98.3" latitud N, -99°88'34.4" longitud O) (Figura 7), las partes aéreas (hojas y tallos) de higuera (*Ricinus communis*) recolectadas de ejemplares ubicados en Corregidora, Qro., México (20°31'40.1" latitud N 100°25'42.7" longitud O) (Figura 8)

y el bagazo, que incluye los residuos que genera la semilla de higuera posterior a la obtención de aceite por extracción mecánica (Figura 9), el cual fue donado por el Laboratorio de Compuestos Naturales Insecticidas, ubicado en la Facultad de Química de la Universidad Autónoma de Querétaro, Centro Universitario.

Posteriormente, el material vegetal de higuera se dejó secar a la sombra por 7 días, una vez seco, se cortó y trituró en una licuadora doméstica (Figura 10); a continuación, se tamizó para dejar un tamaño de partícula de hasta 2 mm.

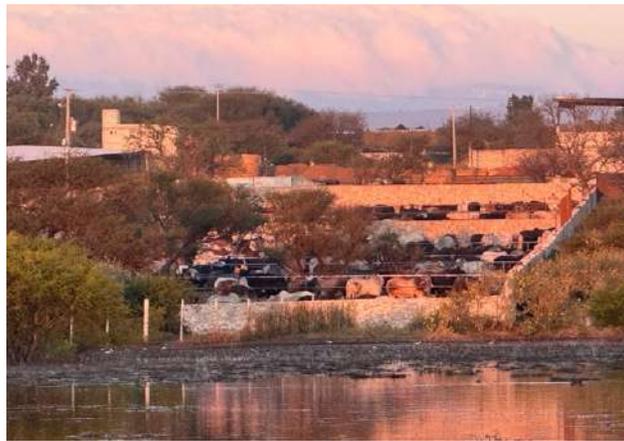


Figura 7. Corral de vacas en Ezequiel Montes, Querétaro (Fuente propia)



Figura 8. Higuera seca (Fuente propia)



Figura 9. Bagazo de higuera (Fuente propia)



Figura 10. Partes aéreas de higuera (Fuente propia)

5.3.2. Análisis fisicoquímicos de los sustratos

5.3.2.1. Relación carbono-nitrógeno (C/N)

Se determinaron los valores en porcentajes de Carbono, Nitrógeno y la relación C/N para cada una de las muestras mediante la metodología establecida por la NMX-AA-67-1985.

A partir de la ecuación 1 se estableció la relación C/N deseada, en este caso será 25:1.

$$\text{Ecuación 1} \quad k = \frac{C_1Q_1 + C_2Q_2 + \dots + C_nQ_n}{N_1Q_1 + N_2Q_2 + \dots + N_nQ_n}$$

Donde:

k es la relación C/N

C es el contenido de Carbono (%)

N es el contenido de Nitrógeno (%)

Q es la carga en kg/g

5.3.2.2. Determinación de sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (SV)

De acuerdo con la EPA, 2001, los sólidos totales y sólidos volátiles se determinan a partir de una muestra perfectamente homogénea en una cápsula de porcelana, la muestra se secó a 105°C (para determinar primero los sólidos totales) y posteriormente se calcinó en una mufla a 550°C (para obtener los sólidos fijos). Los sólidos volátiles se obtuvieron por diferencia entre los sólidos totales y fijos.

Se determinó el % real de ST a partir de la ecuación 2:

$$\text{Ecuación 2} \quad \frac{(\text{peso } x)(\%ST)}{100} = \%real \text{ ST}$$

Con este valor, se hizo una relación para obtener los g necesarios de cada sustrato para definir el % de ST deseado. (Ecuación 3)

$$\text{Ecuación 3} \quad x = \frac{(\% \text{ ajuste ST})(\text{peso } x)}{\% \text{ real ST}}$$

Donde:

x es el peso de la muestra en g

5.3.2.3. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Por definición, la DQO es una medida del equivalente de oxígeno del contenido de materia orgánica de una muestra que es susceptible a la oxidación por un oxidante químico fuerte. En esta ocasión, se midió mediante la metodología descrita por Boyles, 1977.

Inicialmente la muestra se colocó en diluciones en tubos Eppendorf con tapón de teflón, teniendo concentraciones entre 50 y 1000 mg/L. Posteriormente, se centrifugó

durante 10 minutos a 14000 rpm para obtener la DQO soluble. Se sometió a digestión con una solución de dicromato de potasio y se obtuvo la concentración de DQO en mg/L observada por espectrofotometría UV-VIS a 620 nm.

5.3.2.4. Azúcares

Se utilizó la metodología establecida por Dubois y col., (1956). El cuál se basa en la adición de ácido sulfúrico y fenol para conseguir un color amarillo anaranjado en azúcares simples, oligosacáridos, polisacáridos y sus derivados, incluidos los éteres metílicos con grupos reductores libres o potencialmente libres. Se utilizó un espectrofotómetro UV-VIS para observar absorbancia del característico color amarillo-naranja que se mide a 490 nm para hexosas y a 480 nm para pentosas.

5.4. Diseño experimental

Para evaluar el efecto de los sustratos co-digeridos con excretas bovinas en el rendimiento de la producción de biogás, se utilizó un diseño completamente al azar, donde se recolectaron excretas bovinas y residuos de higuera (bagazo y partes aéreas). Se realizaron 2 co-digestiones en experimentación *in vitro*: bagazo con excretas bovinas (B/HB) y partes aéreas con excretas bovinas (PA/HB), cada uno por triplicado y un control positivo (C+HB). Durante un periodo de retención hidráulica de 96 días, se tomaron mediciones diariamente para obtener el rendimiento de biogás.

5.4.1. Digestión anaerobia *In vitro*

La DA se realizó en viales de 120 mL cerrados herméticamente con pinzas Crimper, estos viales contuvieron 80 mL correspondientes al espacio de trabajo. La DA se realizó partir de bagazo y partes aéreas en co-digestión con excretas bovinas, además se mantuvo un control positivo con únicamente excretas bovinas (Cuadro 6). El experimento se llevó a cabo por triplicado con un porcentaje del 8 % de ST a temperatura ambiente. El biogás producido se midió diariamente mediante desplazamiento volumétrico.

Posterior a la co-digestión y antes de colocar las muestras en los viales, se neutralizó el pH.

Cuadro 6. Acrónimos para muestras

Muestra	Acrónimo
Control positivo heces bovinas	C+HB
Partes aéreas con heces bovinas	PA/HB
Bagazo con heces bovinas	B/HB

5.4.2. Diseño y desarrollo de biodigestor de flujo semicontinuo

El criterio principal para diseñar el tamaño de un reactor anaeróbico es la vida útil de los microorganismos. En el biorreactor convencional, la vida útil es equivalente al tiempo de retención hidráulica y está directamente relacionada con el volumen del biorreactor (Baltrenas & Baltrenaite, 2018).

Por tanto, el volumen de trabajo del biorreactor está determinado por la duración de la retención de biomasa en el reactor y la cantidad de biomasa tratada por unidad de tiempo (Ecuación 4).

$$\text{Ecuación 4} \quad V_d = 0.1 \times \frac{M_{MS}}{B_T} \times T_r$$

Donde:

V_d es el volumen de trabajo

M_{MS} es la masa del material seco

B_T es la densidad de la masa

T_r es el tiempo de retención de la masa en el reactor

Entonces, el volumen total del reactor está dado por (Ecuación 5):

$$\text{Ecuación 5} \quad V = 125V_d$$

Donde:

V es el volumen total del reactor en m^3

El volumen de fermentación se obtiene por la Ecuación 6:

$$\text{Ecuación 6} \quad V_f = 0.3142D^2$$

Donde:

V_f es el volumen de fermentación del reactor en m^3

La altura del biorreactor es igual la Ecuación 7:

$$\text{Ecuación 7} \quad H = \frac{4V_f}{3.14D^2}$$

Donde:

D es el diámetro del bioreactor

El volumen del biogás acumulado se da por la Ecuación 8:

$$\text{Ecuación 8} \quad V_{ds} = 0.027D^3$$

Donde:

V_{ds} es el biogás acumulado en m^3

Una vez obtenidos los datos de las ecuaciones anteriores, se realizó el diseño del digestor en el software SolidWorks, donde se le añadieron los siguientes elementos:

- Tubería de entrada
- Tubería de salida
- Gasoducto
- Válvulas de no retorno (Check)
- Muestreador
- Agitador manual
- Sensores de pH, temperatura y oxígeno disuelto

El biodigestor consta de 3 partes: el biodigestor, las trampas para limpiar el biogás y el almacén del biogás (Figura 11).

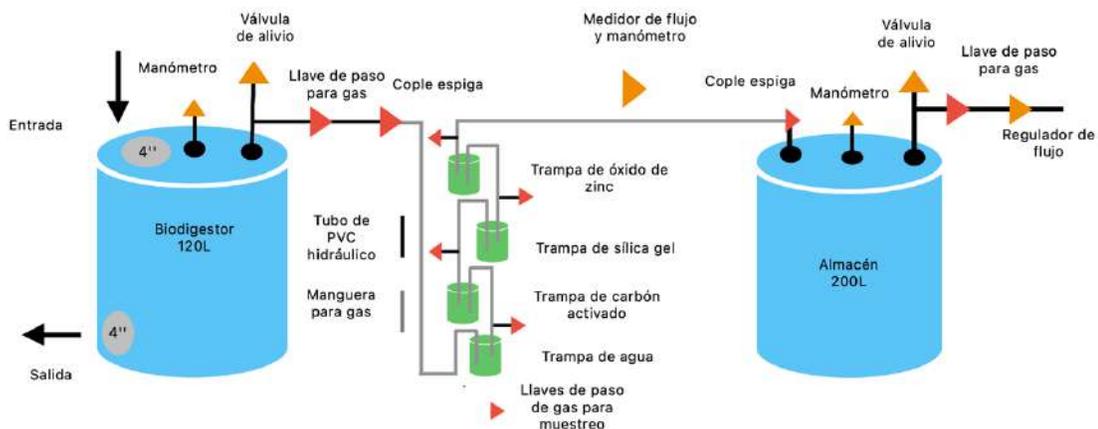


Figura 11. Diagrama de biodigestor, trampas y almacén (Fuente propia)

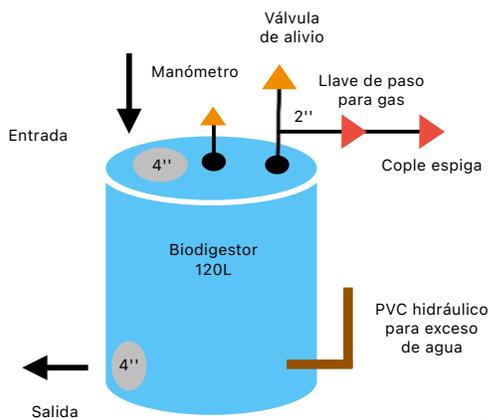


Figura 12. Biodigestor (Fuente propia)

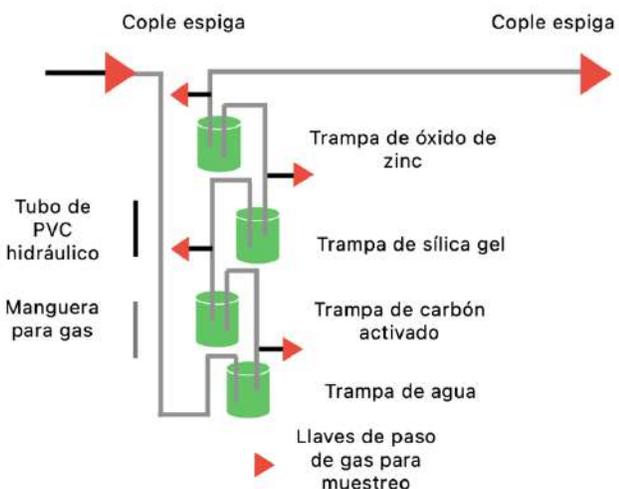


Figura 13. Trampas para biogás (Fuente propia)

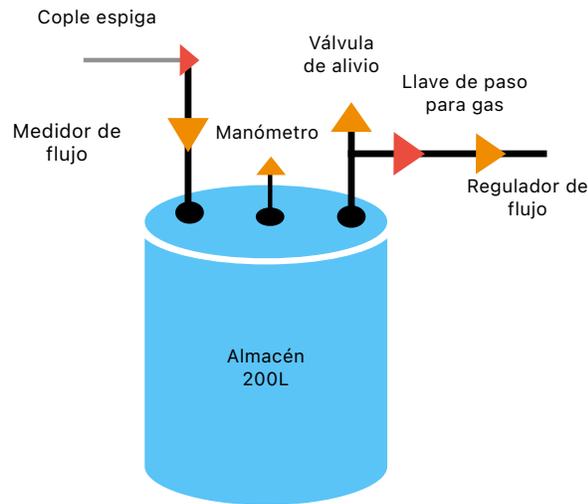


Figura 14. Almacén de biogás (Fuente propia)

Las partes para la construcción del biodigestor se enlistan en el cuadro 7:

Cuadro 7. Lista de materiales para la construcción de un biodigestor de flujo semicontinuo

Capacidad	Material	Cantidad
120 L	Tambo	1 pza.
4 in	Cople PVC hidráulico	2 pzas.
4 in	Llave PVC hidráulico	2 pzas.
4 in	Tubo PVC hidráulico	50 cm
3000 psi	Manómetro	1 pza.
¼ in	Válvula de alivio para gas	1 pza.
2 in	Llave para gas	1 pza.
2 in	Tubo de cobre	1 m
¼ in	Cople espiga para gas	1 pza.
2 in	Cople PVC hidráulico	6 pzas.
2 in	Cople PVC tipo T	1 pza.
2 in	Tubo PVC hidráulico	50 cm
4 in	Sacabocados	1 pza.
--	Cinta teflón	1 pza.

Las partes para la construcción de las trampas para limpiar el biogás se enlistan en el cuadro 8:

Cuadro 8. Lista de material para la construcción de un sistema de limpieza de biogás

Capacidad	Material	Cantidad
2 L	Garrafa	3 pzas.
3/8 in	Manguera para gas	2 m
2 in	Llave para gas	3 pzas.
¼ in	Cople espiga	1 pza.
2 in	Tubo PVC hidráulico	30 cm

Las partes para la construcción del recipiente que almacena el biogás se enlistan en el cuadro 9:

Cuadro 9. Lista de material para la construcción de almacén de biogás

Capacidad	Material	Cantidad
200 L	Tambo	1 pza.
4000 psi	Regulador de flujo	1 pza.
¼ in	Válvula de alivio para gas	1 pza.
2 in	Llave para gas	1 pza.
2 in	Tubo PVC hidráulico	1m
2 in	Cople PVC hidráulico	3 pzas.
2 in	Cople PVC tipo T	1 pza.

6. RESULTADOS

6.1. Caracterización de sustratos

6.1.1. Sólidos totales, volátiles, fijos y contenido de humedad

La determinación de los sólidos se realizó antes y después de la co-digestión, el cuadro 10 muestra los resultados de los análisis de ST, SV y SF para los sustratos en base seca, se observó que las partes aéreas contienen 7.2 % de humedad, el bagazo contiene 5.5 % y las heces bovinas 76.1 %, mientras que el cuadro 13 señala los gramos por litro de ST y SV contenidos tanto en el control positivo como en los sustratos co-digeridos, en esta determinación se percató que el B/HB contiene más concentración de ST y SV por litro, disminuyendo en 18.6 % y 2.5 % de ST y SV con PA/HB, mientras que el control presentó una disminución de más del 50 % para ST y más de 49 % para los SV.

Cuadro 10. Determinación de ST, SV y SF previo a la co-digestión

Muestra	ST (%)	SV (%)	SF (%)
Partes aéreas	92.8	66.3	26.5
Bagazo	94.4	63.6	33.4
Heces bovinas	23.9	16.7	7.1

Cuadro 11. Determinación de ST y SV de co-digestiones

Muestra	ST (g/L)	SV (g/L)
PA/HB	178.8	152.9
B/HB	219.7	156.8
C+HB	121.4	88.5

6.1.2. Determinación de carbohidratos, demanda química de oxígeno y relación C/N

Antes de iniciar la co-digestión, se realizó una evaluación de los carbohidratos, la demanda química de oxígeno (DQO) y la relación carbono-nitrógeno (C/N) de los sustratos (Cuadro 12). Las partes aéreas contenían 514.4 mg/L de carbohidratos, una DQO de 749.4 mg/L y una relación C/N de 18.8:1, lo que refleja algo de desequilibrio entre carbono y nitrógeno para la digestión anaerobia. El bagazo mostró 238.2 mg/L de carbohidratos, una mayor DQO de 918.6 mg/L, pero una relación C/N más baja de 12.5:1, lo que podría indicar una menor disponibilidad de carbono para los microorganismos en comparación con las partes aéreas. Por su parte, las heces bovinas presentaron el mayor contenido de carbohidratos (751.6 mg/L) y DQO (1160.4 mg/L), junto con una relación C/N muy alta de 60.1:1, lo que sugiere una abundancia de carbono en relación con el nitrógeno, lo que podría limitar la digestión si no se mezcla adecuadamente con otros sustratos ricos en nitrógeno.

Tras la co-digestión, en la mezcla de partes aéreas y heces bovinas (PA/HB), los carbohidratos aumentaron a 729.9 mg/L, pero la DQO disminuyó drásticamente a 121.65 mg/L (Cuadro 13). Esto sugiere que una cantidad considerable de la materia orgánica biodegradable fue consumida, reduciendo la demanda de oxígeno para la oxidación de compuestos. En la co-digestión de bagazo y heces bovinas (B/HB), los carbohidratos aumentaron notablemente a 3742 mg/L, aunque la DQO fue de 374.2 mg/L, lo que implica que, si bien hubo un aumento significativo en la cantidad de carbohidratos disponibles, la demanda de oxígeno sigue siendo alta. En el control positivo con heces bovinas (C+HB), los carbohidratos alcanzaron 1338.6 mg/L y la DQO fue de 121.69 mg/L, lo que refleja una degradación similar a la observada en PA/HB.

Cuadro 12. Determinación de carbohidratos, DQO y relación C/N previo a co-digestión

Muestra	Carbohidratos (mg/L)	DQO (mg/L)	Relación C/N
Partes aéreas	514.4	749.4	18.8:1
Bagazo	238.2	918.6	12.5:1
Heces bovinas	751.6	1160.4	60.1:1

Cuadro 13. Determinación de carbohidratos y DQO para co-digestiones

Muestra	Carbohidratos (mg/L)	DQO (mg/L)
PA/HB	729.9	121.65
B/HB	3742	374.2
C+HB	1338.6	121.69

6.2. Producción de biogás *in vitro*

Se obtuvo el rendimiento (Figura 15) de la producción de biogás para el C+HB y las co-digestiones PA/HB y B/HB y el volumen acumulado (Figura 16) de la producción de biogás para el C+HB y las co-digestiones PA/HB Y B/HB a temperatura ambiente.

En las mediciones para el C+HB a temperatura ambiente se encontró que el rendimiento inicial es bajo, alrededor de 0 mL/gSV en los primeros días. A medida que pasan los días, hay un aumento progresivo en el rendimiento de biogás y después del día 25, se observó un aumento significativo en el rendimiento, alcanzando valores de hasta aproximadamente 120 mL/gSV hacia el día 96.

Al experimentar con B/HB, se observó que el rendimiento inicial es superior al del C+HB, comenzando alrededor de 10 mL/gSV en los primeros días. Este rendimiento muestra un patrón de aumento progresivo a lo largo del tiempo, alcanzando aproximadamente 40 mL/gSV hacia el día 96.

Los resultados de la experimentación con PA/HB muestran que el rendimiento inicial es superior al de los otros sustratos, comenzando alrededor de 13 mL/gSV en los primeros días. Este rendimiento también sigue un patrón de aumento progresivo a lo largo del tiempo, alcanzando aproximadamente 68 mL/gSV hacia el día 96.

Todos los sustratos muestran un aumento en el rendimiento de biogás con el tiempo, indicando una producción continua de biogás a medida que avanza el proceso.

El sustrato PA/HB muestra el rendimiento más alto en general, seguido por B/HB y luego C+HB.

La co-digestión de PA/HB representó un aumento en el rendimiento de la producción de biogás 454 % durante los primeros 10 días, posteriormente este se estabilizó (Figura 15), lo que se le atribuye a la adaptación de las bacterias. El C+HB logró alcanzar el rendimiento de la co-digestión PA/HB hasta el día 62.

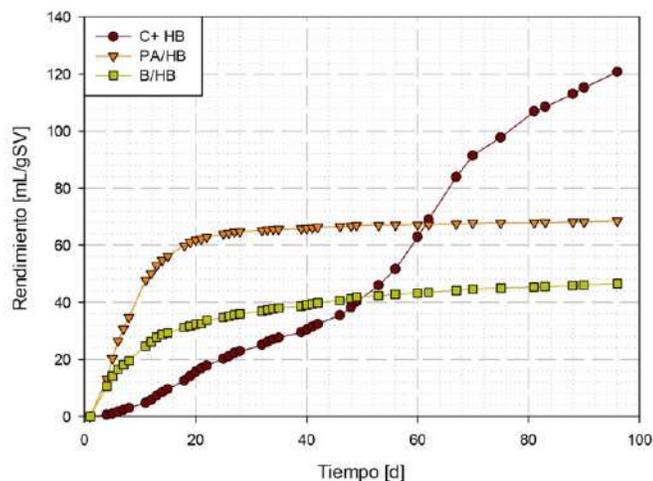


Figura 15. Rendimiento de biogás a temperatura ambiente

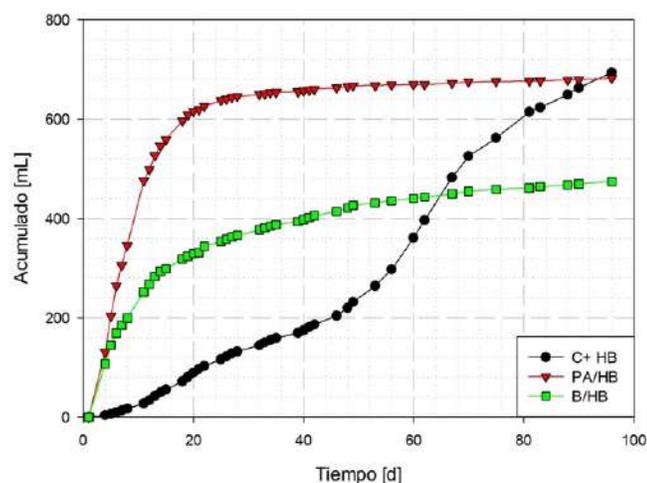


Figura 16. Volumen acumulado a temperatura ambiente

Se obtuvo el rendimiento de la producción de biogás en tres diferentes sustratos a temperatura controlada de 37 °C: heces bovinas solas (C+HB), la co-digestión de bagazo y heces bovinas (B/HB), y la co-digestión de partes aéreas con heces bovinas (PA/HB) (Figura 17). Además, se analizó el volumen acumulado de biogás producido para cada uno de estos sustratos bajo las mismas condiciones (Figura 18).

En las mediciones para C+HB a temperatura controlada, se observó un aumento progresivo en el rendimiento desde los primeros días. A partir del día 25, se observó un incremento significativo, alcanzando aproximadamente 66 mL/gSV. El rendimiento siguió una tendencia ascendente durante todo el período de observación hasta alcanzar 164 mL/gSV.

Por otro lado, al experimentar con B/HB, el rendimiento inicial fue superior al de C+HB, comenzando alrededor de 19 mL/gSV en los primeros días. Este rendimiento muestra un patrón de crecimiento continuo a lo largo del tiempo, alcanzando aproximadamente 63 mL/gSV hacia el día 75, y se estabiliza en torno a 63 mL/gSV entre los días 81 y 96.

En el caso de PA/HB, este sustrato mostró el rendimiento inicial más alto entre todos, comenzando alrededor de 18 mL/gSV en los primeros días. Similar a los otros sustratos, el rendimiento mostró un aumento progresivo y alcanzó valores de

aproximadamente 84.75 mL/gSV hacia el día 96, lo que representa el rendimiento más alto de todos los sustratos evaluados.

El sustrato C+HB mostró un rendimiento más estable y elevado, mientras que el rendimiento de PA/HB y B/HB se mantuvo en los mismos valores después del día 40. El volumen acumulado señala que el sustrato C+HB tuvo una producción final de biogás mayor que los demás sustratos.

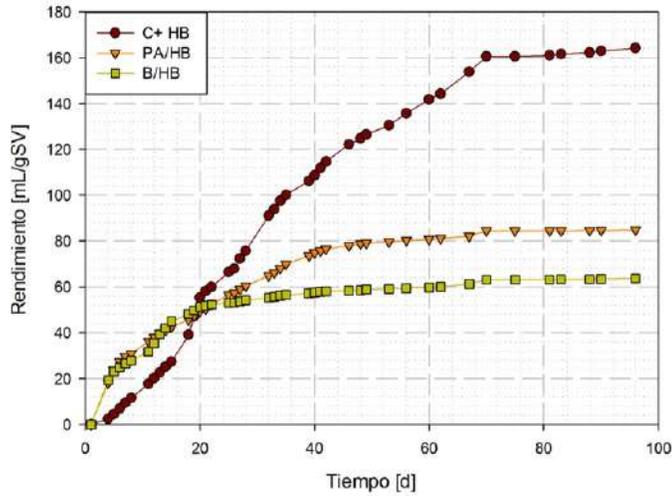


Figura 17. Rendimiento a 37 °C

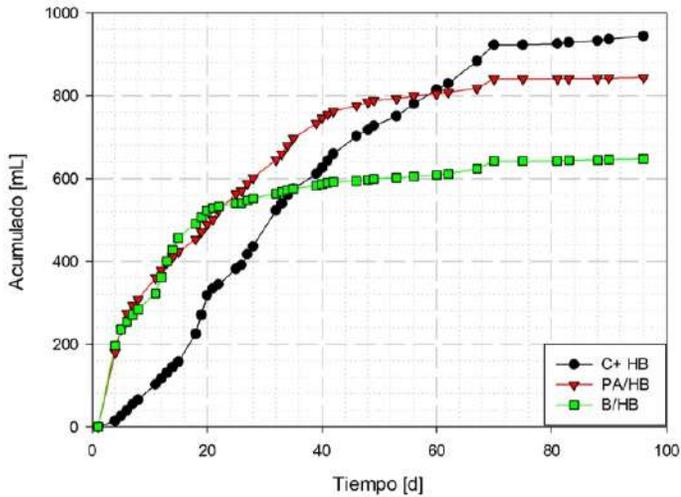


Figura 18. Volumen acumulado a 37 °C

6.3. Diseño del biodigestor

El diseño contó con un sistema estructurado en tres partes fundamentales: el biodigestor (Figura 19 y 20), las trampas (Figura 21) y el almacén. El biodigestor permite la introducción de las co-digestiones, asegurando la consistencia necesaria para facilitar el proceso anaeróbico. Esta estructura constituyó el espacio principal donde ocurre la fermentación anaeróbica, en la cual los microorganismos descomponen la materia orgánica, generando biogás como subproducto, este compartimento está sellado herméticamente para evitar la entrada de oxígeno y mantener las condiciones necesarias para la producción de biogás. Posteriormente, la vía de salida permitió la descarga de los residuos, un subproducto estabilizado que puede utilizarse como fertilizante.



Figura 19. Parte frontal de Biodigestor (Fuente propia)



Figura 20. Parte lateral de Biodigestor (Fuente propia)

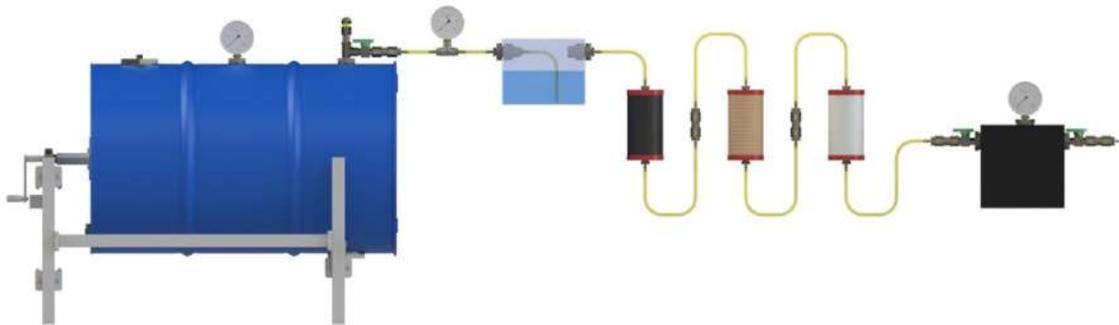


Figura 21. Biodigestor, trampas y almacén (Fuente propia)

Para mejorar el proceso, se determinó un ciclo de carga y descarga diario, basado en un tiempo de retención de 25 días. Esto significa que cada se introducen aproximadamente 4 litros de mezcla orgánica en el biodigestor, los cuales son

desplazados a través del sistema, empujando una cantidad equivalente de digestato hacia la salida.

Se estableció una rutina de agitación que se realiza una vez al día para asegurar la distribución uniforme de las bacterias y del calor en toda la mezcla, lo cual favorece el proceso de digestión.

La base del biodigestor se construyó con PTR de 1.5 in y el biodigestor está constituido de plástico duro, instalado en el invernadero de la Facultad de Química UAQ (Figura 22, 23 y 24).



Figura 22. Montaje de biodigestor (Fuente propia)



Figura 23. Biodigestor montado (Fuente propia)



Figura 24. Trampas para biogás montadas (Fuente propia)

7. DISCUSIÓN

Kaur et al. (2018) obtuvieron 11.4 % de humedad en hojas y tallos de higuierilla previamente deshidratados, obteniendo 74.3 %, 88.7 % y 9.16 % de SV, ST y SF respectivamente, teniendo aumentos del 36.8 % y 10.7 % para el contenido de humedad y SV, asimismo, se obtuvieron disminuciones del 4.6 % y 65.34 % para ST y SF en comparación con los resultados obtenidos en este trabajo indicados en el cuadro 10; sin embargo, Kalogiannis et al., (2016) reportaron para el mismo sustrato deshidratado un contenido del 4.4% para SF, contenido aún menor que el reportado por Kaur et al. lo que indica que existen diferencias en los contenidos de sólidos debido a las condiciones de crecimiento y manipulación de la planta.

Para el bagazo de la semilla Alves et al. (2010), observaron 9.97 % de contenido de humedad, lo que representa un aumento de casi el doble en comparación con esta investigación, sin embargo, esto puede deberse a las diferencias en el método de extracción del aceite, ya que estos autores lo realizaron por soxhlet, mientras que el bagazo utilizado en este trabajo se obtuvo por extracción mecánica. Por otra parte Hilioti et al., (2017), reportaron el mismo porcentaje de humedad y de SF de 5.6 % y 92.7 % de ST, el contenido de humedad tiene un valor cercano al 5.5 % obtenido para esta investigación y de igual manera, para los SV solo existe una diferencia del 1.5 % entre lo reportado y lo obtenido, donde sí existe una mayor diferencia es en el contenido de SF con una disminución del 83.2 % en comparación con lo establecido en el cuadro 10. Mientras que la comparación del contenido de SV se realizó con datos de bagazo de semilla de jatropha, la cual pertenece a la familia Euphorbiaceae, (Chandra et al., (2012) reportaron 17.3 %, teniendo una diferencia de 46.3 % en

comparación con este estudio, los autores no reportan la procedencia del bagazo, por ende, es difícil determinar la diferencia entre los dos valores, por su parte, (Raheman & Mondal, 2012a) para el mismo sustrato de *Jatropha*, obtuvieron 72.7 % de SV, sólo 9.1 % más a lo indicado en el cuadro 10.

En cuanto a las heces bovinas (Katheem Kiyasudeen et al., (2015), reportaron contenido de humedad de 80.7 % para el sustrato fresco, y 19.3 % de ST, en contraste con la humedad y los ST obtenidos en el cuadro 10, solo disminuyó 4.6 % para la humedad y aumentó en la misma medida para los ST, lo que indican un buen manejo del sustrato.

La semilla de higuera normalmente es utilizada para la extracción de aceite y posteriormente la producción de biogás, en tanto que las partes aéreas de la planta simplemente son desechadas, sin embargo, una planta perteneciente a la familia Euphorbiaceae es la *Manihot esculenta* también conocida como yuca fue estudiada por Saravanan et al. (2019), ellos encontraron una DQO de 1856 g/L en aguas residuales de esta planta, no reportaron contenido de carbohidratos ni relación C/N, el contenido de DQO superó por mucho a lo encontrado en esta investigación, sin embargo, no reportan si las aguas residuales corresponden a las partes aéreas, a las raíces o a ambas. Por otra parte, (Kaur et al., (2018), encontraron una relación C/N de 9.3:1 para las partes aéreas de la higuera, mientras que (Hilioti et al., (2017) reportaron 27.5:1 de C/N, el primer valor es poco más del doble en comparación a lo encontrado en el Cuadro 12, esto puede deberse a que los autores utilizaron la planta fresca, y para este trabajo, las partes aéreas fueron deshidratadas, mientras que el

segundo valor fue menos de la mitad debido que de igual manera que en esta investigación, el sustrato fue deshidratado.

Para el bagazo de semilla, (Alves et al., (2010) reportaron un contenido de C/N de 7.4:1, aunque Hilioti et al. (2017) encontraron para el mismo sustrato un contenido de 15.7:1, de acuerdo con el cuadro 6, la relación C/N para el bagazo de 12.5:1, se encuentra entre los dos valores de los diferentes autores, aunque se asemeja más al segundo valor, con 3.2:1 de diferencia. Por otra parte, (Chandra et al., 2012), encontraron una relación C/N de 12.7:1 pero para el bagazo de la semilla de jatropha, este valor es muy similar al conseguido en el cuadro 12 para el bagazo de semilla, debemos recordar que ambas plantas pertenecen a la misma familia.

Por el contrario, Thakur et al., (2023), registraron para heces bovinas, contenido de 224 g/L de DQO, mientras que (Oladejo et al., 2020), informaron 450 g/L para el mismo sustrato, ambos valores son mayores a lo conseguido para esta investigación, por otro lado, estos últimos autores, obtuvieron una relación C/N de 9:1, 6.7 veces menos que el mostrado en el cuadro 12, no obstante, Chandra et al. (2012) reportaron 22.7:1 la relación C/N pero para estiércol de ganado en general. Los valores en cuanto a excretas bovinas son muy variados debido a diversos factores que interfieren indirectamente en los análisis químicos, tales como la especie, la dieta, la flora intestinal del animal, entre otros.

Para la producción de biogás, (Thakur et al., (2023), realizaron el análisis de la producción de biogás utilizando dos reactores inoculados con excreta de vaca a 37 °C, teniendo dos condiciones; la primera utilizando desechos de comida y lodos de

depuradora con una proporción de 50:50, obtuvieron un rendimiento de biogás de 368 mL/gSV, el segundo reactor fue llenado con una proporción de 2:98 de los mismos sustratos, encontrando un rendimiento mayor de 407 mL/gSV en el día 124, estos rendimientos son superiores a los encontrados para esta investigación, el primero supera a la co-digestión de las PA/HB en un 216 %, mientras que para el B/HB con un 479 %, para el segundo caso de los autores (2:98), la co-digestión de PA/HB disminuyó en 380 % y para el B/HB en 540 %, cabe destacar que los resultados obtenidos en la Figura 17 son muy variados debido al TRH y a que el sustrato de heces bovinas utilizado por Thakur et al. no fueron frescas sino que se utilizaron como inóculo.

Aili Hamzah et al., (2023) utilizaron las excretas bovinas como sustrato único pero con diferentes cargas y de igual forma, controlaron la temperatura a 37 °C, para una carga de 30 gSV/L obtuvieron un rendimiento de biogás de 192.53 mL/gSV al día 42, pero para una carga orgánica menor de 14 gSV/L alcanzaron un rendimiento de 125.8 mL/gSV, de acuerdo al rendimiento de 164.1739 mL/gSV obtenidos en la Figura 17, para el C+HB se encuentra entre los rangos anteriormente mencionados, ya que para la carga superior, solo disminuyó 17 %, mientras que para la carga inferior, aumentó más del 23 %. Otros autores que utilizaron las heces bovinas con 10 % de ST como sustrato fueron (Raheman & Mondal, 2012b), a temperatura controlada con un TRH de 40 días, alcanzaron un rendimiento de 166 mL/gSV, sólo 1 % más que el logrado para este trabajo en la Figura 17.

A temperatura ambiente (Yusuf et al., (2011), realizaron co-digestiones con excretas bovinas y equinas en una proporción de 1:1, logrando un rendimiento de biogás de 10.6 mL/gSV al día 30, en comparación con Achinas et al. (2018), quienes sólo utilizando heces bovinas, en 24 días obtuvieron 104 mL/gSV de igual manera a temperatura ambiente, en comparación con los resultados presentados en la Figura 15 para el C+HB, se encontró un rendimiento de biogás de 120.7 mL/gSV, valor cercano a lo establecido por Achinas et al. con solo 13.8 % menos que lo reportado en la Figura 15.

En esta investigación se encontraron resultados similares en cuanto al rendimiento para temperatura ambiente y para temperatura controlada, por lo que no se considera necesario realizar un gasto energético extra en el control de la temperatura, pues la intención del diseño del biodigestor es implementar un ahorro energético. Por otra parte, Zhang & Smith (2004) indican en su estudio para la optimización de reactores batch y semi-batch que el sistema de alimentación por lotes permite que la temperatura del sustrato se mantenga estable para un mejor desarrollo de las bacterias en cada etapa de la digestión anaerobia, además, permite que el pH no incremente ni disminuya drásticamente y a su vez mantiene un sustrato homogéneo favoreciendo a la mezcla de la co-digestión.

El biodigestor cuenta con sistemas de seguridad y versatilidad, en cuanto a la seguridad, los sistemas de tuberías cuentan con válvulas y manómetros que evitan la sobrepresión, facilitan el control del gas y evitan fugas que puedan dañar la salud de las personas. Además, cuenta con una estructura desmontable en donde va

instalado el tanque principal. Esto permite transportar con facilidad desde el biodigestor, hasta el almacenamiento al sitio donde sea requerido; el diseño en conjunto ofrece un sistema de fácil manejo y seguro para su empleo en viviendas, en comparación con modelos tradicionales como el de Cerón (2022) y Gutiérrez & Quispe (2024) que no incluye ninguna válvula ni manómetro para monitorear el biogás producido y está soportado por una estructura de madera que no se puede transportar y puede romperse fácilmente. La elección de los materiales está dirigida a mantener la integridad del biodigestor durante un largo periodo de tiempo, como lo indican en sus estudios Gutiérrez & Quispe (2024), quienes trabajaron con PVC y acero estructural.

8. CONCLUSIONES

- Se analizaron las propiedades de los sustratos (heces bovinas, bagazo y partes aéreas) antes y después de la co-digestión, considerando parámetros como sólidos totales, volátiles, fijos, contenido de humedad, carbohidratos, demanda química de oxígeno (DQO) y relación C/N. Pevio a la co-digestión, las partes aéreas contenían 514.4 mg/L de carbohidratos, 749.4 mg/L de DQO y una relación C/N de 18.8:1; el bagazo, 238.2 mg/L de carbohidratos, una DQO de 918.6 mg/L y una relación C/N de 12.5:1; y las heces bovinas, el mayor contenido con 751.6 mg/L de carbohidratos, 1160.4 mg/L de DQO y una alta relación C/N de 60.1:1. Tras la co-digestión, la mezcla PA/HB alcanzó 729.9 mg/L de carbohidratos con una DQO reducida a 121.65 mg/L, indicando consumo de materia orgánica. En B/HB, los carbohidratos se incrementaron a 3742 mg/L y la DQO a 374.2 mg/L, reflejando aún alta demanda de oxígeno. En el control C+HB, los carbohidratos fueron de 1338.6 mg/L y la DQO de 121.69 mg/L, similar al comportamiento de PA/HB.
- Se evaluó el rendimiento en la co-digestión de residuos animales y vegetales para la producción de biogás *in vitro*. La evaluación de sustratos para biogás mostró que el control positivo (C+HB) presentó un rendimiento inicial bajo (0 mL/gSV), que comenzó a aumentar significativamente después del día 25, alcanzando 120 mL/gSV al día 96. En comparación, la co-digestión con bagazo y heces bovinas (B/HB) mostró un rendimiento inicial de 10 mL/gSV y un incremento progresivo hasta 40 mL/gSV al final del periodo. El sustrato de partes aéreas y heces bovinas (PA/HB) resultó el más eficiente, comenzando en 13 mL/gSV y alcanzando 68 mL/gSV al día 96, con un aumento del 454 % en los primeros 10 días debido a la rápida adaptación bacteriana. Estos resultados confirman que PA/HB tuvo el mejor rendimiento, seguido de B/HB y luego C+HB.
- Se diseñó un biodigestor de flujo semicontinuo estructurado en tres etapas (biodigestor, trampas y almacén) el cual permite la producción, purificación, almacenamiento y control de metano obtenido de biogás producido por la co-

digestión de residuos de higuera y heces bovinas, para su empleo en una vivienda sustentable.

- Con la implementación de este biodigestor podría contribuir a la economía circular en áreas rurales, aprovechando los residuos locales para generar energía sostenible y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.
- Futuras investigaciones podrían centrarse en optimizar el diseño del biodigestor y en adaptar su escala a necesidades más grandes, como comunidades o pequeñas empresas, permitiendo una producción de biogás eficiente en diversas aplicaciones energéticas.

9. BIBLIOGRAFÍA

Achinas, S., Li, Y., Achinas, V., & Willem Euverink, G. J. (2018). Influence of sheep manure addition on biogas potential and methanogenic communities during cow dung digestion under mesophilic conditions. *Sustainable Environment Research*, 28(5), 240–246. <https://doi.org/10.1016/J.SERJ.2018.03.003>

Adila, A., Che Man, H., Jamali, N. S., Siajam, S. I., & Ismail, M. H. (2023). Effect of organic loading on anaerobic digestion of cow dung: Methane production and kinetic study. *Heliyon*, 9(6), e16791. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2023.E16791>

Álvarez, J. A., Otero, L., & Lema, J. M. (2010). A methodology for optimising feed composition for anaerobic co-digestion of agro-industrial wastes. *Bioresource Technology*, 101(4), 1153–1158. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.09.061>

Alves, E. E. N., Souza, C. D. F., Inoue, K. R. A., & Leite, T. D. S. (2010). Potential of production of biogas from the castor bean (*Ricinus communis* L.) cake. *American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting 2010, ASABE 2010*, 5(10), 9–3834. <https://doi.org/10.13031/2013.29831>

Angelidaki, I., & Sanders, W. (2004). Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants. In *Reviews in Environmental Science and BioTechnology*. Kluwer Academic Publishers.

Arellano, L., Rosales, M. C., & Huerta, C. (2014). El estiércol: material de desecho, de provecho y algo más. (A. C. M. Instituto de Ecología, Ed.; Primera edición, Vol. 1). INECOL.

Audi, J., Belson, M., Patel, M., Schier, J., & Osterloh, J. (2005). Ricin Poisoning A Comprehensive Review (Vol. 294). *CLINICALS CORNER*. <http://jama.jamanetwork.com/>

Baltrenas, P., & Baltrenaite, E. (2018). Small Bioreactors for Management of Biodegradable Waste. In *Small Bioreactors for Management of Biodegradable Waste*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-78211-9>

Boyles, W. (1997). *The Science of Chemical Oxygen Demand* (Vol. 9). Hach Company.

- Cerón, I.** (2022). Biodigestor doméstico para comunidades rurales y urbanas. *Ciencia y Filosofía*, 31–46. <https://doi.org/10.38128/cienciayfilosofa.v7i7.44>
- Chandra, R., Vijay, V. K., Subbarao, P. M. V., & Khura, T. K.** (2012). Production of methane from anaerobic digestion of jatropha and pongamia oil cakes. *Applied Energy*, 93, 148–159. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.10.049>
- Deng, L., Liu, Y., & Wang, W.** (2020). Biogas technology. In *Biogas Technology*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-4940-3>
- Deublein, D., & Steinhauser, A.** (2011). Biogas from waste and renewable resources: an introduction (p. 550). Wiley-VCH.
- Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A., & Smith, F.** (1956). Colorimetric Method for Determination of Sugars and Related Substances. <https://pubs.acs.org/sharingguidelines>
- Duque-Acevedo, M., Belmonte-Ureña, L. J., Cortés-García, F. J., & Camacho-Ferre, F.** (2020). Agricultural waste: Review of the evolution, approaches and perspectives on alternative uses. *Global Ecology and Conservation*, 22. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e00902>
- Environmental Protection Agency.** (2001). Method 1684: Total, Fixed, and Volatile Solids in Water, Solid, and Biosolids. Engineering and Analysis Division.
- Gutiérrez, H., & Quispe, R.** (2024). Diseño y Construcción de un Biodigestor para la Producción de Biogás a partir de Residuos Orgánicos en Bolivia. *Horizonte Académico*, 4(4), 65–75. <https://doi.org/10.70208/3007.8245.v4.n4.14>
- Hayes, R., & Mmbaga, J.** (2013). *Introduction to Chemical Reactor Analysis* (2nd ed.). CRC Press.
- Hilioti, Z., Michailof, C. M., Valasiadis, D., Iliopoulou, E. F., Koidou, V., & Lappas, A. A.** (2017). Characterization of castor plant-derived biochars and their effects as soil amendments on seedlings. *Biomass and Bioenergy*, 105, 96–106. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.06.022>
- Instituto de Diversificación y Ahorro de la Energía. (2007). *Biomasa: Digestores anaerobios* (1st ed.). BESEL, S.A.

- Kalogiannis**, K. G., Stefanidis, S. D., Michailof, C. M., & Lappas, A. A. (2016). Castor bean cake residues upgrading towards high added value products via fast catalytic pyrolysis. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.07.001>
- Katheem**, S., Hakimi, M., & Ismail, S. A. (2015). Characterization of Fresh Cattle Wastes Using Proximate, Microbial and Spectroscopic Principles. *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci.*, 15(8), 1700–1709. <https://doi.org/10.5829/idosi.aejaes.2015.15.8.235>
- Kaur**, R., Gera, P., Jha, M. K., & Bhaskar, T. (2018). Pyrolysis kinetics and thermodynamic parameters of castor (*Ricinus communis*) residue using thermogravimetric analysis. *Bioresource Technology*, 250, 422–428. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.11.077>
- Khalid**, A., Arshad, M., Anjum, M., Mahmood, T., & Dawson, L. (2011). The anaerobic digestion of solid organic waste. In *Waste Management* (Vol. 31, Issue 8, pp. 1737–1744). <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.03.021>
- Khanal**, S. K., Giri, B., Nitayavardhana, S., & Gadhamshetty, V. (2017). Anaerobic Bioreactors/Digesters: Design and Development. In *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering: Biological Treatment of Industrial Effluents* (pp. 261–279). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63665-2.00010-2>
- Kumar**, V., & Tuohy, M. (2018). *Biogas: Fundamentals, Process, and Operation* (M. Tabatabaei & H. Ghanavati, Eds.; Vol. 6). Springer. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-77335-3>
- Lifeder**. (2020, December 18). *Ricinus communis: características, hábitat, toxicidad, usos*. <https://www.lifeder.com/ricinus-communis/#>
- Liu**, S. (2020). *Bioreactor design and operation*. In *Bioprocess Engineering*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-821012-3.00018-x>
- Maheshwari**, P., & Kovalchuk, I. (2016). Genetic transformation of crops for oil production. In *Industrial Oil Crops* (pp. 379–412). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-1-893997-98-1.00014-2>
- Merino**, M. E. (2019). *Diseño e implementación de reactor anaerobio semicontinuo para aprovechamiento de cáscaras de cacao*. Universidad de Piura.

- Monsalvo**, R., Romero, Ma. del R., Miranda, Ma. G., & Muñoz, G. (2014). Balance de materia y energía - Procesos industriales (1st ed.). Grupo Editorial Patria.
- Moran**, S. (2019). How to do a mass and energy balance. In *An Applied Guide to Process and Plant Design* (pp. 145–151). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-814860-0.00010-0>
- Murphy**, J. D., & Thamsiroj, T. (2013). Fundamental science and engineering of the anaerobic digestion process for biogas production. In *The Biogas Handbook: Science, Production and Applications* (pp. 104–130). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1533/9780857097415.1.104>
- Polprasert**, C. (2007). *Organic Waste Recycling* (3rd ed.). IWA Publishing.
- Raheman**, H., & Mondal, S. (2012). Biogas production potential of jatropha seed cake. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.12.042>
- Raja**, I. A., & Wazir, S. (2017). Biogas Production: The Fundamental Processes. *Universal Journal of Engineering Science*, 5(2), 29–37. <https://doi.org/10.13189/ujes.2017.050202>
- Scheper**, T., & Ahring, B. K. (2003). *Biomethanation I* (Scheper T, Ed.; 1st ed.). Springer.
- Scholz**, V., & da Silva, J. N. (2008). Prospects and risks of the use of castor oil as a fuel. *Biomass and Bioenergy*, 32(2), 95–100. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.08.004>
- Secretaría General**. (2023). Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos. Diario Oficial de La Federación. PR
- Stams**, A. J. M. (1994). Metabolic interactions between anaerobic bacteria in methanogenic environments. *Antonie van Leeuwenhoek*, 66, 271.
- Tauseef**, S. M., Premalatha, M., Abbasi, T., & Abbasi, S. A. (2013). Methane capture from livestock manure. *Journal of Environmental Management*, 117, 187–207. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.12.022>
- Teniza**, G., Solís-Oba, M. M., & Pérez-López, M. E. (2015). Producción de metano utilizando residuos cunícolas. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 14.
- Thakur**, H., Rashmi, Verma, N. K., Sharma, V., Kumar, S., Dhar, A., Prakash, T., & Powar, S. (2023). Anaerobic co-digestion of food waste, bio-flocculated sewage

sludge, and cow dung in CSTR using E(C2)Tx synthetic consortia. *Environmental Technology & Innovation*, 32, 103263. <https://doi.org/10.1016/J.ETI.2023.103263>

Varnero, M., & María, T. (2011). *Manual de Biogas*. In Proyecto CHI/00/G32. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Wilken, D., Rauh, S., Bontempo, G., Hofmann, F., Strippel, F., & Kramer, A. (2019). *Biowaste to Biogas* (Fachverband Biogas, Ed.). German Biogas Association.

Worstell, J. (2015). Batch and Semi-Batch Reactors. In *Batch and Semi-Batch Reactors* (pp. 1–6). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-801305-2.00001-1>

Yusuf, M. O. L., Debora, A., & Ogheneruona, D. E. (2011). Ambient temperature kinetic assessment of biogas production from co-digestion of horse and cow dung. <https://Rae.Agriculturejournals.Cz/Doi/10.17221/25/2010-RAE.Html>, 57(3), 97–104. <https://doi.org/10.17221/25/2010-RAE>

Zhang, J., & Smith, R. (2004). Design and optimisation of batch and semi-batch reactors. *Chemical Engineering Science*, 59(2), 459–478. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2003.10.004>

Zhang, R., & El Mashad, H. (2020). *Biogas Energy from Organic Wastes*. In N. M. **Holden**, M. L. Wolfe, J. A. Ogejo, & E. J. Cummins (Eds.), *Introduction to Biosystems Engineering* (2nd ed., Vol. 13). Virginia Tech Publishing. <https://doi.org/10.21061/INTROBIOSYSTEMSENGINEERING/BIOGAS>