

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



**DESARROLLO DE UN BIODIGESTOR PARA OBTENCIÓN DE
BIOGÁS A PARTIR DE ESTIÉRCOL BOVINO Y VARA DE ALGODÓN**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS**

**PRESENTA
ÁLVARO ANDRÉS ORTIZ PÉREZ**

DIRECTORES

Director de tesis

Dr. Marcos Alberto Coronado Ortega

Codirector de tesis

Dr. Ricardo Torres Ramos

Mexicali, B.C.

Junio del 2024

Dedicatoria

Con todo mi amor, dedico este proyecto a mis padres, Heber Donald Ortiz Estrada y Fabiola Pérez Sequeda, con quienes he vivido los momentos más felices de mi vida. Agradezco su dedicación para hacer realidad mis sueños; a ustedes les entrego mi corazón y mi más profundo agradecimiento.

A mis queridos hermanos, Carmen Alicia, Maryurís, Yaneth y José Luis, por nuestro apoyo mutuo y constante en cada desafío que hemos enfrentado y superado juntos.

A mis estimados tíos Carlos, Juan Carlos, Luis, Nedís, Pedro, Juan Alonso, Margarita y Paulina. A mis primos, Juan David, Andrea, Carlitos, Paola, Camila, Vale, Luis², Miguel, Aldair y Alice. A mis queridos sobrinos, Alice Sofia, Carlitos, Wilfran, Matías, Justín, Shaira, Ariana, Kevin y Gilma.

Dedico y agradezco de corazón a Jhonathan Castillo y Ricardo Torres, quienes estuvieron a mi lado en los momentos más difíciles. Su apoyo y amistad significan mucho para mí y siempre los llevaré en mi corazón. Con aprecio a Mary Triny y a Gissel.

Con cariño, dedico este trabajo también a mis amigos de Colombia. Lilitiana, Yina, Abelardo, Jimmy, Yomenson, Yanís, Ada, Sergio, Jorge, Josimar y Luíscarlos, Su tiempo y esfuerzo a la distancia han sido importantes para mí. Les ofrezco cada página de este proyecto con todo mi afecto y gratitud.

A la Sra Magola por su cariño y estar en momentos cruciales de mi vida.

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a Dios por permitirme concluir este proyecto. Su guía y fortaleza me han sostenido en cada paso del camino. Agradezco infinitamente sus bendiciones y la serenidad que me ha brindado para seguir adelante.

Extiendo mi agradecimiento a México por acogerme y permitirme conocer a personas que me ayudaron a adaptarme y a aprender más sobre esta cultura. Su hospitalidad y calidez han sido fundamentales para mi integración y bienestar.

Agradezco profundamente a CONACYT, al Instituto de Ciencias Agrícolas (ICA) y al Instituto de Ingeniería de la UABC, bajo la dirección del Dr. Mario Curiel. Gracias por admitirme y apoyarme en la culminación de mi maestría y la realización de este proyecto. Su confianza y respaldo han sido esenciales para mi desarrollo académico.

Quiero expresar mi sincero agradecimiento al Dr. Marcos Coronado, mi director de tesis, por su orientación a lo largo de este camino, permitiéndome superar desafíos y llegar al final con éxito. Igualmente, deseo reconocer y agradecer al Dr. Ricardo Torres, mi codirector, cuyo apoyo esencial ha sido fundamental para la realización exitosa de este proyecto de investigación.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Laboratorio de Biomasa y Bioenergéticos, brindarme la oportunidad de trabajar en sus instalaciones y por abrirme las puertas de su laboratorio. Agradezco también a mis compañeros del laboratorio por su colaboración, apoyo y compañerismo durante este proceso. En especial a los Hnos. Armenta.

Agradecer al Laboratorio de Botánica del ICA, liderado por la Dra. Mary, por proporcionar el espacio, el uso de las incubadoras de mis biodigestores y otros recursos necesarios para este proyecto. Su apoyo fue fundamental para la realización de este trabajo.

A la familia Torres-Beleño, muchas gracias por abrirme las puertas de su casa. A la Sra. Deisy, el Sr. Félix e Isabela, les agradezco profundamente su hospitalidad y calidez durante mi estancia.

Agradecer al Dr Carlos del Instituto de Ciencias Agrícolas por su colaboración y apoyo en algunos análisis y temas relacionados a mi proyecto.

A la familia Castillo-Sandoval, por hacer más amena mi estadía en Mexicali. Muchas gracias a Jhon, Gisell, July y Fluppy por su acogida y compañía.

Agradezco el acompañamiento a Félix Beleño, Ismael Rivera, Fernando Martínez, Alfredo Duarte por su apoyo en cada una de las etapas en la que me colaboraron en ciertas actividades específicas de mi proyecto.

A mis amigos y demás familiares en Colombia. Tíos, primos y sobrinos quienes han estado conmigo en cada etapa de este proceso, ofreciéndome su tiempo, comprensión y aliento.

Agradecimiento al Sr Rene Y Michel por su amabilidad, hospitalidad y apoyo en mi estancia en Mexicali.

TABLA DE CONTENIDO

Dedicatoria.....	2
Agradecimientos.....	3
Lista de figuras.....	10
Lista de tablas.....	12
Resumen.....	14
Abstract.....	16
Capítulo I	
Introducción y objetivos.....	18
1.1. Introducción.....	18
1.2. Justificación.....	19
1.3. Objetivos.....	22
1.3.1. Objetivo general.....	22
1.3.2. Objetivos específicos.....	22
Referencias.....	23
Capítulo II	
Estado del arte de la producción de biogás.....	26
2.1. Biogás y sus aplicaciones.....	26
2.1.1. Definición de biogás.....	26
2.1.2. Biometano.....	26
2.1.3. Combustión.....	26
2.1.4 Producción de calor o vapor.....	27
2.1.5. Producción de electricidad.....	27
2.1.6. Purificación de biogás.....	27

2.2. Residuos utilizados en la producción de biogás.....	27
2.2.1. Residuos y emisiones de la ganadería bovina	28
2.2.2. Residuos de la agricultura; cultivos aldoneros.....	32
2.3. Proceso de la digestión.....	35
2.3.1. Digestión aeróbica.....	35
2.3.2. Digestión anaeróbica.....	35
2.3.3. Fases de la digestión anaerobia para la producción de biogás.....	36
2.3.3.1. Hidrólisis.....	37
2.3.3.2. Acidogénesis.....	37
2.3.3.3. Acetogénesis.....	38
2.3.3.4. Metanogénesis.....	38
2.4. Parámetros y variables asociadas a la biodigestión.....	38
2.5. Beneficios ambientales de la biodigestión anaeróbica.....	40
2.6. Factores determinantes en el proceso de producción de biogás.....	40
2.6.1. Naturaleza y composición bioquímica de las materias primas.....	40
2.6.2. Relación carbono/nitrógeno de las materias primas.....	40
2.6.3. Niveles de sólidos totales y sólidos volátiles.....	40
2.6.4. Temperatura.....	41
2.6.5. Tiempo de retención hidráulico (TRH) y velocidad de carga orgánica.....	41
2.6.6. Rangos de pH y alcalinidad.....	41
2.6.7. Ácidos grasos volátiles.....	42
2.6.8. Nitrógeno.....	42
2.7. Promotores de la metanogénesis.....	42
2.7.1. Inoculantes biológicos.....	42
2.7.2. Agitación.....	42
2.8. Tipos de biodigestores.....	43
2.8.1. Modelo chino.....	43
2.8.2. Modelo indio.....	44

2.8.3. Digestores horizontales.....	44
2.8.4. Digestor batch.....	45
2.9. Estado de la técnica sobre biodigestores.....	46
2.9.1. Biodigestores actuales reportados en la literatura.....	46
2.9.2. Biodigestores y métodos reportados en patentes.....	49
2.10. Rendimientos de biogás de acuerdo con la biomasa.....	52
2.11. Características fisicoquímicas del biogás.....	52
2.12. Características fisicoquímicas del fertilizante.....	53
Referencias.....	54

Capítulo III

Metodología para la caracterización fisicoquímica y la producción de biogás.....	64
3.1. Preparación de la muestra.....	64
3.2. Análisis próximo.....	66
3.2.1. Humedad.....	66
3.2.2. Materia volátil.....	67
3.2.3. Cenizas.....	68
3.2.4. Carbono fijo.....	68
3.3. Análisis de composición química.....	69
3.3.1. Extracción en solvente orgánico.....	69
3.3.2. Extracción en agua caliente.....	70
3.3.3. Determinación de lignina.....	71
3.3.4. Determinación de holocelulosa.....	72
3.3.5. Determinación de celulosa.....	73
3.3.6. Determinación de hemicelulosa.....	74
3.4. Carbono orgánico.....	74
3.4.1. Preparación de la curva de calibración.....	74
3.4.2. Preparación de las muestras.....	75

3.5. Determinación de demanda química de oxígeno.....	76
3.5.1. Preparación de la curva de calibración.....	76
3.5.2. Preparación de soluciones.....	76
3.5.3. Preparación del reactivo digestor.....	76
3.5.4. Preparación de las muestras a analizar.....	77
3.6. Determinación de sólidos totales, sólidos volátiles totales y sólidos fijos totales.....	77
3.6.1. Sólidos totales.....	77
3.6.2. Sólidos volátiles totales.....	78
3.6.3. Sólidos fijos totales.....	78
3.7. Conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos y pH.....	79
3.8. Determinación de biogás y medición indirecta de biometano.....	81
3.9. Descripción detallada el diseño experimental.....	81
3.9.1. Objetivo del experimento.....	81
3.9.2. Variable de respuesta.....	83
3.9.3. Descripción del proceso de digestión anaerobia	85
3.10. Diseño del biodigestor.....	87
3.10.1. Selección de ubicación.....	87
3.10.2. Establecimiento de parámetros de diseño y componentes necesarios.....	87
3.10.3. Descripción del biodigestor.....	88
3.10.4. Construcción del biodigestor.....	88
3.10.5. Instalación experimental.....	89
Referencias.....	90
Capítulo IV	
Análisis y discusión de resultados.....	93
4.1. Análisis próximo	93

4.2. Composición química.....	94
4.3. Carbono orgánico.....	97
4.4. Demanda química de oxígeno.....	98
4.5. Sólidos totales, sólidos volátiles totales y sólidos fijos totales.....	100
4.6. Conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos y pH.....	101
4.7. Producción de biogás en los biodigestores tipo batch de 2 L.....	102
4.8. Fabricado del reactor.....	104
4.9. Producción de biogás en el biodigestor de 20 L.....	112
4.10. Estimación del potencial de producción de biogás.....	115
Conclusiones.....	117
Otros productos académicos.....	119
Anexos.....	107

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribución de ganado bovino en el mundo.	28
Figura 2. Inventario de ganado bovino de México por Estado.....	29
Figura 3. Fuentes de emisión de la ganadería y la agricultura.....	30
Figura 4. Superficie cosechada de algodón en el mundo.....	33
Figura 5. Inventario de cosecha de algodón en México por Estado.....	33
Figura 6. Fases de la digestión anaerobia.....	36
Figura 7. Biodigestor tipo chino.....	43
Figura 8. Biodigestor tipo indio.....	44
Figura 9. Biodigestor tipo horizontal.....	45
Figura 10. Biodigestor tipo batch.....	45
Figura 11. Ubicación de vara de algodón en el valle de Mexicali.....	64
Figura 12. Ubicación de estiércol bovino en el valle de Mexicali.....	65
Figura 13. Muestras de estiércol.....	65
Figura 14. Vara de algodón molida y licuadora Osterizer.....	66
Figura 15. Determinación de lignina.....	72
Figura 16. Determinación de holocelulosa.....	73
Figura 17. Espectrofotómetro visible iris.....	75
Figura 18. Medidor de pH Hanna Instrument 716800 Grochek.....	79
Figura 19. Sistema de desplazamiento de agua.....	83
Figura 20. Sistema de desplazamiento de agua.....	84
Figura 21. Esquema de desplazamiento de agua.....	84

Figura 22. Distribución de los biodigestores 2 L.....	86
Figura 23. Distribución de los biodigestores 2 L.....	86
Figura 24. Salida de tuberías de los biodigestores 2 L.....	86
Figura 24. Secuencia de operaciones para la construcción del biodigestor 20 L.....	88
Figura 25. Aditamentos para el control de calentamiento del biodigestor.....	88
Figura 26. Secuencia de operaciones para la instalación del biodigestor 20 L.....	89
Figura 27. Diseño y construcción del biodigestor.....	89
Figura 28. Identificador de la solución.....	105
Figura 29. Ecuación de regresión.....	105
Figura 30. Gráfico factorial de cada factor.....	106
Figura 31. Grafico factorial de las interacciones.....	106
Figura 32. Gráfico de contorno estiércol-agua.....	107
Figura 33. Gráfico de contorno estiércol-vara.....	108
Figura 34. Gráfico de contorno varal-agua.....	108
Figura 35. Diagrama de Pareto de los efectos estandarizados.....	102
Figura 36. Vista frontal del biodigestor en AutoCAD 3d.....	109
Figura 37. Biodigestor fabricado.....	110
Figura 38. Vista frontal del biodigestor.....	111
Figura 39. Cartuchos de hierro, purga de agua y depósito de biogás.....	112
Figura 40. Biodigestor discontinuo de 20 L.....	112
Figura 41. Sistema para el control de temperatura.....	113
Figura 42. Burbujas al interior del biodigestor a tres semanas operación.....	113
Figura 43. Primera corrida experimental con el biodigestor de 20 L.....	114

Figura 44. Segunda corrida experimental con el biodigestor de 20 L.....115

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características del estiércol bovino.....	31
Tabla 2. Características de la vara de algodón.....	34
Tabla 3. Microorganismos en la digestión anaerobia del estiércol.....	37
Tabla 4. Temperatura de los microorganismos de la digestión anaerobia.....	39
Tabla 5. pH de los microorganismos de la digestión anaerobia.....	39
Tabla 6. Biodigestores reportados en la literatura.....	46
Tabla 7. Biodigestores y métodos reportados en patentes.....	50
Tabla 8. Rendimientos de producción de metano.....	52
Tabla 9. Composición química del biogás.....	52
Tabla 10. Resumen de normas y metodologías utilizadas.....	80
Tabla 11. Diseño experimental para la producción de biometano.....	82
Tabla 12. Componentes y materiales para la construcción del biodigestor 20 L.....	82
Tabla 13. Análisis próximo del estiércol bovino.....	93
Tabla 14. Análisis próximo de la vara de algodón.....	93
Tabla 15. Análisis de extraíbles en acetona y agua del estiércol bovino.....	95
Tabla 16. Análisis de extraíbles en acetona y agua de la vara de algodón.....	95
Tabla 17. Porcentajes lignocelulósicos del estiércol bovino.....	96
Tabla 18. Porcentajes lignocelulósicos de la vara de algodón.....	96
Tabla 19. Absorbancias obtenidas de los estándares.....	97
Tabla 20. Resultados de carbono orgánico.....	98
Tabla 21. Absorbancias obtenidas en la curva de calibración.....	99

Tabla 22. Resultados de demanda química de oxígeno.....	99
Tabla 23. Resultados de sólidos totales, sólidos volátiles y sólidos fijos.....	100
Tabla 24. Parámetros obtenidos del medidor de pH.....	101
Tabla 25. Volúmenes obtenidos en la producción de biogás.....	102
Tabla 26. Resultados del análisis de varianza en Minitab.....	103
Tabla 27. Coeficientes Codificados del ANOVA.....	104
Tabla 28. Modelo del ANOVA.....	104
Tabla 29. Identificador de la solución.....	105
Tabla 30. Ecuación de regresión.....	105

Resumen

El valle de Mexicali es una importante región ganadera en Baja California que puede contribuir significativamente a la producción de biogás debido a su inventario ganadero, el cual supera las 300,000 cabezas de ganado bovino. Se ha estimado que la cantidad de estiércol que puede generar cada bovino varía entre 15-20 kg por día. Por otra parte, uno de los cultivos de mayor producción en el estado es el algodón, la cual produjo alrededor de 78,700 t de algodón. Esta producción conllevó a la generación aproximada de 118,050 t de vara de algodón. En la actualidad, estos residuos no tienen una disposición final bien definida y generan problemas de contaminación ambiental. Sin embargo, los residuos presentan importantes propiedades fisicoquímicas como el alto contenido de materia orgánica, la cual puede ser utilizada como fuente de biomasa para la producción de biogás y electricidad. Por lo tanto, el objetivo de este proyecto fue desarrollar un biodigestor horizontal que permita llevar a cabo la digestión anaerobia para la producción de biogás a partir de estiércol bovino y vara de algodón.

La caracterización de los residuos se realizó conforme a lo establecido en las diferentes normas internacionales ASTM E871-82, ASTM E872-82, ASTM E830-87, TAPPI T264, TAPPI 207, ASTM D1106-96, ASTM D 1104, ASTM D1103-60, NMX-AA-034-SCFI-2015 y Potenciometría. En cuanto a los biodigestores se estableció un diseño experimental $2^2 \times 3$ con dos factores a dos niveles y un factor a tres niveles, para establecer la condición óptima de rendimiento de biogás, utilizando biodigestores tipo batch. Con la finalidad de escalar a un biodigestor de 20 L. El biodigestor de 20 L se fabricó con material acrílico transparente y este se puso en funcionamiento para determinar la cantidad de biogás generado.

Los resultados indican que el estiércol bovino y la vara de algodón tienen diferentes contenidos de humedad, materia volátil, cenizas y carbono fijo. El estiércol bovino presentó en promedio 68.77 % de humedad, 3.44 % de materia volátil, 21.52 % de cenizas y 75.03 % de carbono fijo. En cambio, de la vara de algodón presentó en promedio 6.17 % de humedad, 69.62 % de materia volátil, 5.21 % de cenizas y 25.16

% de carbono fijo. Por otra parte, el estiércol bovino y la vara de algodón presentaron diferentes porcentajes de material lignocelulósico. El estiércol bovino presentó en promedio 32.41 % de lignina, 66.85 % de holocelulosa, 48.92 % de celulosa y 17.93 % de hemicelulosa y la vara de algodón presentó en promedio 27.71 % de lignina, 72.19 % de holocelulosa, 58.70 % de celulosa y 13.49 % de hemicelulosa.

El análisis ANOVA mostró que tanto el estiércol como la vara tienen un impacto significativo en la producción de metano, el estiércol es el factor más dominante con un F-Value de 1239.32 y un P-Value de 0.000. Este resultado sugiere que la calidad y cantidad del estiércol son fundamentales para optimizar la producción de biometano. A pesar de que la vara también muestra un efecto significativo (F-Value = 835.61, P-Value = 0.000), su influencia es menor en comparación con el estiércol.

Por lo tanto, la condición 5:1 agua - estiércol sin vara es la más favorable para la producción de metano, como lo indican tanto los datos empíricos como el análisis estadístico. Los altos valores F y los bajos P-Values para agua, estiércol y sus interacciones subrayan la importancia crítica de estos factores. En consecuencia, esta condición se escaló al biodigestor de 20 L.

Se llevó a cabo una digestión anaerobia a una escala mayor utilizando un biodigestor discontinuo de 20 L. En dos corridas experimentales, la cantidad de biogás acumulado después de 45 días de operación varió entre 5,200 mL y 5,800 mL. Estas variaciones pueden atribuirse a parámetros sensibles del proceso que son difíciles de controlar, como la fluctuación en la actividad microbiana del estiércol y los cambios bruscos en la temperatura ambiente, comunes en esta región de México.

Abstract

The Mexicali Valley is an important livestock region in Baja California that can contribute significantly to biogas production due to its livestock inventory, which exceeds 300,000 head of cattle. It has been estimated that the amount of manure that can be generated by each cattle varies between 15-20 kg per day. One of the state's major production crops is cotton, which led to a production of around 78,700 tons of cotton. This production led to the generation of approximately 118,050 t of cotton bolls. At present, these residues do not have a well-defined final disposal and generate environmental contamination problems. However, the residues present important physicochemical properties such as high organic matter content, which can be used as a source of biomass for the production of biogas and electricity. Therefore, the objective of this project was to develop a horizontal biodigester to carry out anaerobic digestion for the production of biogas from cattle manure and cottonseed stalks.

The waste characterization was performed by following the different international standards ASTM E871-82, ASTM E872-82, ASTM E830-87, TAPPI T264, TAPPI 207, ASTM D1106-96, ASTM D 1104, ASTM D1103-60, NMX-AA-034-SCFI-2015 and Potentiometry were used. Regarding the biodigesters, an experimental design was established with three factors at two levels each, to establish the optimum condition for biogas yield, using Batch type biodigesters. In order to scale up to a 20 L biodigester. The 20 L biodigester was made of transparent acrylic material and was put into operation to determine the amount of biogas generated.

The results indicate that bovine manure and cottonseed have different moisture, volatile matter, ash and fixed carbon contents. The average moisture content of cattle manure was 68.77%, volatile matter 3.44%, ash 21.52% and fixed carbon 75.03%. On the other hand, the cottonseed straw had an average of 6.17 % moisture, 69.62 % volatile matter, 5.21 % ash and 25.16 % fixed carbon. On the other hand, cattle manure and cottonseed presented different percentages of lignocellulosic material. Bovine manure presented on average 32.41 % lignin, 66.85

% holocellulose, 48.92 % cellulose and 17.93 % hemicellulose and cottonseed straw presented on average 27.71 % lignin, 72.19 % holocellulose, 58.70 % cellulose and 13.49 % hemicellulose.

ANOVA analysis showed that manure as well as rod have a significant impact on methane production, manure being the most dominant factor with an F-Value of 1239.32 and a P-Value of 0.000. This result suggests that manure quality and quantity are critical to optimize biogas production. Although the rod also shows a significant effect (F-Value = 835.61, P-Value = 0.000), its influence is minor compared to manure.

Therefore, the 5:1 water to manure condition without rod is the most favorable for methane production, as indicated by both empirical data and statistical analysis. The high F-values and low P-Values for water, manure and their interactions underline the critical importance of these factors. Consequently, this condition was scaled up to the 20 L biodigester.

Anaerobic digestion was carried out on a larger scale using a 20 L batch biodigester. In two experimental runs, the amount of biogas accumulated after 45 days of operation varied between 5,200 mL and 5,800 mL. These variations can be attributed to sensitive process parameters that are difficult to control, such as fluctuation in manure microbial activity and sudden changes in ambient temperature, which are common in this region of Mexico.

Capítulo I

Introducción y objetivos

1.1. Introducción

El crecimiento poblacional a nivel mundial ha impulsado una expansión sin precedentes en la industria agropecuaria con el fin de satisfacer la demanda y consumo de alimentos. La industria ganadera representa uno de los sectores de mayor crecimiento, generando un importante incremento en la emisión de gases de efecto invernadero (GEI). Dentro del sector agropecuario la industria ganadera es responsable de más del 50 % de la emisión de GEI [1]. Por otra parte, la producción de alimentos ha forzado al sector agrícola a realizar un uso intensivo de las tierras. Esto ha provocado la generación masiva de residuos agrícolas que deben ser dispuestos de manera adecuada para reducir los impactos ambientales de la agricultura. Sin embargo, la quema de residuos agrícolas como mecanismo de remoción persiste en la actualidad y genera cerca del 30 % de las emisiones de GEI [2].

Baja California es una de las regiones agrícolas y ganadera más importantes de México. La mayor parte de la actividad agropecuaria del Estado se desarrolla principalmente en el valle de Mexicali. En 2022, el inventario ganadero estatal superó las 300,000 cabezas de bovino, lo cual representa un desafío relevante para el manejo y la gestión del estiércol bovino [3,4]. La disposición final del estiércol bovino no está bien definida y frecuentemente se reportan incendios accidentales que afectan significativamente la calidad del aire, especialmente en la ciudad de Mexicali [5,6].

Uno de los cultivos de mayor producción en el estado es el algodón. La superficie cosechada en 2022 fue aproximadamente de 17,200 ha, lo que condujo a una producción alrededor de 78,700 t de algodón. El índice de generación de residuos para los cultivos de algodón se estima en 1.5 t de vara por tonelada de algodón cosechado. Por lo tanto, se generaron aproximadamente 118,050 t de vara de algodón en 2022. Esto presenta desafíos importantes para manejar correctamente

los residuos de la vara del algodón. Debido a que la quema al aire libre de estos residuos en los campos causa problemas ambientales, como la mala calidad del aire y afecta a las comunidades cercanas [7].

Estos residuos orgánicos tienen el potencial de producir biogás, lo que podría ser una gran oportunidad para promover una fuente de energía renovable que cuide el medio ambiente en México [8]. Por lo tanto, este proyecto tuvo como objetivo el desarrollo de un biodigestor tipo horizontal para llevar a cabo la digestión anaerobia de estiércol bovino y vara de algodón, basándose en la necesidad de encontrar soluciones sostenibles para la gestión de residuos ganaderos y para aprovechar los recursos disponibles en la región del valle de Mexicali, contribuyendo así a la mitigación de emisiones de GEI y promoviendo fuentes de energía renovable y limpias.

Por otra parte, este proyecto evaluó la producción de biogás a partir de los residuos agropecuarios importantes del estado de Baja California: estiércol bovino y vara de algodón. Para ello, se realizó un diseño experimental con agua, estiércol y vara de algodón, mediante un diseño factorial mixto $2^2 \times 3$ a una temperatura de 35 °C. La fase inicial implicó el uso de treinta y seis biodigestores tipo batch de pequeña escala para identificar la condición más eficiente en la producción de biometano. Luego, se escaló a un reactor de 20 L bajo las condiciones encontradas en la fase inicial.

1.2. Justificación

El incremento demográfico y la creciente demanda de alimentos han resultado en una expansión de las actividades del sector agropecuario en la región de Baja California. Entre las actividades agrícolas se destaca el cultivo de algodón, con una superficie cosechada de 17,200 ha en 2022. Este cultivo generó alrededor de 118,050 t de vara de algodón teniendo en cuenta un índice de generación de residuo equivalente a 1.5 t residuo/tonelada de algodón cosechado [9]. En cuanto a las actividades pecuarias, la industria del ganado bovino es una de las más importantes. El inventario ganadero estatal superó las 300,000 cabezas de bovino, lo cual genera alrededor de 4.5 millones de kg de estiércol/día. Esta estimación se realiza teniendo

en cuenta un índice de generación de estiércol por bovino de 15 kg de estiércol/día [10].

Una parte importante de las actividades agropecuarias del Estado se llevan a cabo en el valle de Mexicali. Por lo tanto, es indispensable realizar un manejo adecuado de los residuos agropecuarios para evitar problemas ambientales. En la actualidad, estos residuos no tienen una disposición final bien definida y se convierten en problemas ambientales y de salud pública. Frecuentemente, se reportan incendios accidentales o provocados sobre la quema de residuos agrícolas o ganaderos [6, 11]. La quema a cielo abierto de estos residuos deteriora considerablemente la calidad del aire y la salud de las personas del valle de Mexicali [7,12]. Además, se ha informado que la quema *insitu* afecta a largo plazo la fertilidad de los suelos [13].

En este contexto, el desarrollo de un biodigestor horizontal para la digestión anaerobia de los residuos estiércol bovino y vara de algodón, emerge como alternativa prometedora para realizar una mejor disposición de los residuos agropecuarios y evitar los problemas ambientales actuales. La digestión anaerobia permite convertir los residuos orgánicos en biogás, el cual es un combustible gaseoso constituido principalmente por metano [14].

La tecnología de digestión anaerobia ofrece la oportunidad de obtener biocombustible que pueden ser utilizado para la generación energía térmica o eléctrica, incluyendo la calefacción de hogares, cocción de alimentos y generación vapor [15]. Bajo este enfoque la generación de biogás permite reducir la dependencia de combustibles fósiles y las emisiones de GEI [16]. Disponer de una fuente alternativa y renovable de gas combustible, es especialmente importante para México, debido a que este país importa por encima del 80 % del gas natural que consume [17,18]. En 2021, se importaron más de 20 millones de m³ de gas natural para satisfacer la demanda de energía eléctrica, automotriz, domestica, térmica, entre otras [19]. El aprovechamiento energético permite convertir un residuo que en la actualidad constituye un problema de contaminación ambiental, en una fuente renovable de energía que contribuye en la diversificación de los

combustibles, la valorización de los residuos agropecuarios y la disminución de la dependencia hacia los combustibles fósiles [20].

Otra ventaja de la digestión anaerobia es la obtención de un biofertilizante que se genera como subproducto del proceso de digestión [21]. Este biofertilizante se puede utilizar para incrementar los nutrientes en suelos agrícolas y disminuir del uso de fertilizantes sintéticos. Además, la generación de un subproducto con valor agregado incentiva la economía rural, promueve la economía circular y disminuye los costos de operación en la obtención de biogás [22].

Investigaciones previas han reportado que la codigestión de estiércol con otros residuos o material lignocelulósico pudieran incrementar la eficiencia del proceso de digestión anaerobia por dos razones principales [23]. Primera, el residuo lignocelulósico puede incrementar el área superficial de contacto entre los microorganismos y la materia orgánica [24]. Segunda, los residuos lignocelulósicos contienen carbono y nitrógeno que pudiera ser degradado por las bacterias e incrementar la producción de biogás [25].

Es necesario realizar una mejor disposición del estiércol bovino y vara de algodón en Mexicali, debido a los problemas ambientales y al deterioro de la calidad del aire producto de la quema a cielo abierto de estos residuos. El aprovechamiento de los residuos mediante la tecnología de digestión anaerobia requiere estudios adicionales que permitan establecer de manera experimental las condiciones más adecuadas para la obtención de biogás teniendo en cuenta las características fisicoquímicas particulares de los residuos generados en esta región. Por lo tanto, en este proyecto se propone desarrollar un biodigestor para estudiar el potencial de producción de biogás a partir de la codigestión de estiércol y vara de algodón del valle de Mexicali.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Desarrollar un biodigestor horizontal que permita llevar a cabo la digestión anaerobia para la producción de biogás a partir de estiércol bovino y vara de algodón.

Objetivos específicos

- ❖ Determinar la caracterización fisicoquímica del estiércol bovino y vara de algodón.
- ❖ Establecer un diseño experimental para evaluar el efecto de la composición del sustrato sobre el rendimiento de biogás, con el fin de seleccionar la mejor condición de trabajo utilizando biodigestores tipo batch.
- ❖ Diseñar un biodigestor horizontal utilizando material acrílico transparente y conexiones para toma de muestras que permitan monitorear variables sensibles y modificar los parámetros fisicoquímicos durante el proceso de digestión.
- ❖ Poner en funcionamiento el biodigestor horizontal para determinar la cantidad de biogás generado y estimar el potencial de producción de biogás en el valle de Mexicali.

Referencias

- [1] FAO, 2021. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Agriculture, Forestry and Other Land Use Emissions by Sources and Removals by Sinks. Visitado el 2 de octubre de 2022. <https://www.fao.org/3/i3671e/i3671e.pdf>.
- [2] Banco mundial. <https://www.bancomundial.org/es/topic/agriculture/overview>.
- [3] SIAP, 2021. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Gobierno de México. Visitado: 1 de octubre de 2022. <https://www.gob.mx/siap/documentos/poblacion-ganadera-136762?idiom=es>.
- [4] José Alberto Ávila Miramontes, Universidad de sonora división de ciencias biológicas y de la salud departamento de agricultura y ganadería 2014, el cultivo del algodón generalidades y sistemas de producción en el noroeste de México.
- [5] Industrial New. Sufre Mexicali mala calidad del aire por quemas ganaderas. <https://www.industrialnewsbc.com/2021/11/17/sufre-mexicali-mala-calidad-del-aire-por-quemas-ganaderas/>.
- [6] El Imparcial. <https://www.elimparcial.com/mexicali/mexicali/Vecinos-afectados-por-quema-de-estiercol-20150310-0002.html>. Vecinos afectados por quema de estiércol.
- [7] S.M. Mendoza, Caracterización de residuos agroindustriales de algodón mediante espectrometría de emisión atómica de plasma por microondas RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias, vol. 47, núm. 1, pp. 71-81, 2021.
- [8] Mario Rios, Martin Kaltschmitt, Electricity generation potential from biogas produced from organic waste in Mexico, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 54, February 2016, Pages 384-395.
- [9] M.Shyam. Tecnologías de energías renovables basadas en residuos agrícolas para el desarrollo rural. Sostenimiento energético. Desarrollo 2002.

- [10] Yaqoob, H., Teoh, Y. H., Din, Z. U., Sabah, N. U., Jamil, M. A., Mujtaba, M. A., & Abid, A. (2021). The potential of sustainable biogas production from biomass waste for power generation in Pakistan. *Journal of Cleaner Production*, 307, 127250.
- [11] La voz de la frontera. Van por la regulación de las quemas agrícolas. Febrero de 2022. Visitado el 20 octubre del 2022. <https://www.lavozdelafrontera.com.mx/local/van-por-la-regulacion-de-las-quemas-agricolas-en-mexicali-7904680.html>.
- [12] EMM Esteves, AMN Herrera, VPP Esteves, CDRV Morgado. Evaluación del ciclo de vida de la producción de biogás de estiércol: una revisión. 2019.
- [13] Centro CIMMYT. Cómo evitar los daños al suelo causados por quemas agrícolas. <https://idp.cimmyt.org/como-evitar-los-danos-al-suelo-causados-por-quemas-agricolas/>. Febrero de 2022. Visitado el 21 de noviembre de 2022.
- [14] Anon. Anaerobic Digestion of Food Processing and Municipal Solid Waste (MSW). *J. Environ. Sci., Comput. Sci. Eng. Technol.* 2020.
- [15] Yang Liu, Jing Du, Xiaomei Ye, Kequan Chen, Qingbo Xiao, Zhiyang Zhang, Chunhui Cao, Ting Han, Xiangping Kong, Yonglan Xi. The new strategy of using humic acid loaded biochar to enhance the anaerobic digestion of cow manure for methane production. *Journal of Cleaner Production*. Volume 428, 20 November 2023
- [16] M. Kaltschmitt, W. Streicher. *Energie aus biomasse*. Vieweg Teubner, Germany (2009), pp. 339-532.
- [17] Comisión Nacional de Hidrocarburos, 2019. Prospectiva de la producción nacional de gas natural. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/488400/Prospectiva_Produccion_Nacional_Gas_Natural__2_.pdf.

- [18] Energía-hoy, 2021. México bate récord en importación de gas natural. Nota periodística. <https://energiyahoy.com/2021/09/23/mexico-bate-record-en-importacion-de-gas-natural-durante-primer-semester-de-2021>.
- [19] SIE, 2022. Sistema de información energética. Gobierno de México. Volumen de importación de gas natural por punto de internación. <https://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&cvecua=PMXE1C16>.
- [22] Keda Jin, Andrea Pezzuolo, Shaban G. Gouda, Shijiang Jia, Mohamed Eraky, Yi Ran, Mengdi Chen, Ping Ai. Valorization of bio-fertilizer from anaerobic digestate through ammonia stripping process: A practical and sustainable approach towards circular economy. *Environmental Technology & Innovation*. Volume 27, August 2022.
- [23] Martí-Herrero, J., Alvarez, R., Rojas, M. R., Aliaga, L., Céspedes, R., & Carbonell, J. (2014). Biofilm de bajo costo para mejorar la digestión anaeróbica en regiones de clima frío con digestores tubulares. *Revista de investigación e innovación agropecuaria y de recursos naturales*, 1(1), 81-91.
- [24] Mahmoodi-Eshkaftaki, M., & Mahmoudi, M. (2021). An optimum process for anaerobic digestion of wild tree wastes under alkaline pretreatments in biogas plants. *Environmental Technology & Innovation*, 24, 101907.
- [25] Abd Allah, W. E., Tawfik, M. A., Sagade, A. A., Gorjian, S., Metwally, K. A., & El-Shal, H. (2021). Methane production enhancement of a family-scale biogas digester using cattle manure and corn stover under cold climates. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 45, 101163.

Capítulo II

Estado del arte de la producción de biogás

2.1. Biogás y sus aplicaciones

2.1.1. Definición de biogás

El biogás es una mezcla gaseosa que se forma principalmente a partir de diversos residuos y subproductos, como desechos biodegradables, residuos ganaderos como el estiércol bovino y residuos agrícolas como la vara de algodón. También, se origina a partir de fuentes de aguas residuales, como lodos de plantas de tratamiento y aguas residuales industriales [1]. Esta mezcla gaseosa resultante, está compuesta principalmente por metano y dióxido de carbono, con presencia de otros compuestos en menor proporción como sulfuro de hidrógeno, amoníaco y vapor de agua. Este recurso puede aprovecharse mediante la combustión para generar energía térmica y eléctrica [2,3]. Además, el biogás producido a partir de biomasa tiene el potencial de reducir la emisión de gases de efecto invernadero entre un 42 % y un 82 % en comparación con el gas natural [4].

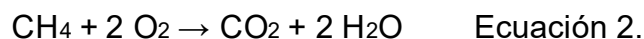
2.1.2. Biometano

El biogás puede ser sometido a un proceso de purificación o eliminación de impurezas como el CO₂ para producir biometano. Una forma indirecta de producir biometano es mediante la captura de CO₂ en una solución alcalina de NaOH, la cual se da una reacción química que se expresa en la Ecuación 1 [5].



2.1.3. Combustión

La combustión es un proceso químico que implica la oxidación del biogás y la producción de CO₂ y H₂O como se muestra en la Ecuación 2.



Se ha reportado que la combustión eficiente del biogás posibilita la producción de energía en pequeña y mediana escala, la cual se convierte en una opción atractiva para diversas industrias o comunidades. Además, los sistemas de combustión requieren bajo mantenimiento y pueden operar de manera continua, ofreciendo una solución confiable y rentable para la generación de energía sustentable a partir de la combustión del biogás [6].

2.1.4. Producción de calor o vapor

El biogás como fuente de energía limpia se puede utilizar para generar energía térmica o vapor, siendo útil en actividades como cocción de alimentos y calentamiento de agua. El uso del biogás requiere de adaptaciones de quemadores convencionales. Estas adaptaciones deben tener requisitos moderados de calidad, incluyendo niveles bajos de H_2S y un volumen de flujo alto [7].

2.1.5. Generación de electricidad

La generación de electricidad a partir del biogás optimiza la eficiencia mediante el uso de motores de combustión interna, aunque también pueden utilizarse turbinas de gas, siempre y cuando se realice una adecuada eliminación de H_2S y vapor de agua del biogás [8].

2.1.6. Purificación del biogás

La purificación del biogás es crucial por dos razones principales. Primero, para aumentar su capacidad calorífica y, segundo, para garantizar que cumpla con los estándares necesarios para su uso en diversas aplicaciones, como motores, calderas, celdas de combustible y vehículos. Para lograr estos objetivos, se deben eliminar el CO_2 , el vapor de agua y otros gases no deseados del biogás [9].

2.2. Residuos utilizados en la producción de biogás

Los residuos sólidos a nivel mundial están estimados en casi dos mil millones de toneladas anuales según un estudio del banco mundial (2018), de los cuales ochocientas mil toneladas corresponden a residuos orgánicos. De estos residuos

los países desarrollados generan el 32 %, mientras que los países en vía de desarrollo producen el 57 % [10].

2.2.1. Residuos y emisiones de la ganadería bovina

La ganadería es una actividad del sector primario que proporciona una gran variedad de alimentos y proteína a la sociedad. El ganado bovino lo conforma una amplia variedad de razas y cruces entre razas, incluyendo bovinos producto de modificaciones genéticas. Cada raza, cruce o modificación genética, le confiere características propias a los bovinos, las cuales son utilizadas para obtener alguna ventaja o beneficio económico. Estos beneficios consisten en el incremento de producción de carne, leche y la capacidad de adaptación del ganado a diferentes tipos de climas y condiciones geográficas. De esta forma la ganadería bovina se ha extendido masivamente alrededor del mundo. En el contexto internacional, los principales productores de ganado bovino son Brasil, India y Estados Unidos de América. La Figura 1, presenta los principales países con el mayor inventario de cabezas de ganado bovino de acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) [11].

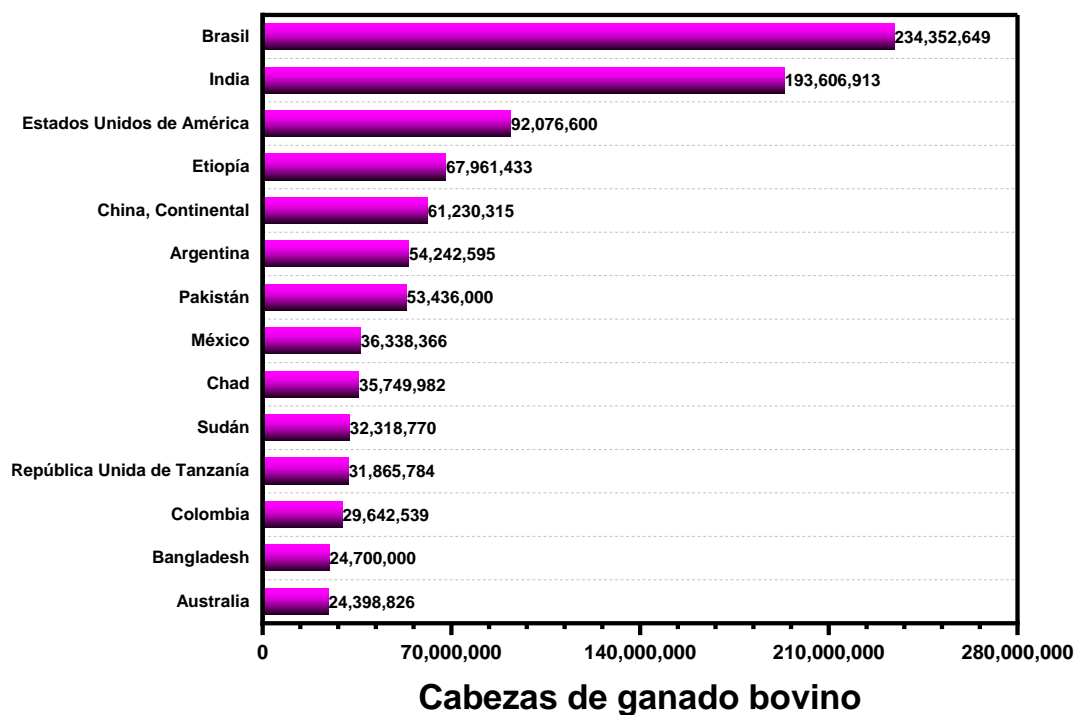


Figura 1. Distribución de ganado bovino en el mundo en 2022 [11].

Como se puede apreciar en la Figura 1, México es uno de los países con mayor población ganadera en América y el mundo. Esta actividad económica sumada a la agricultura, pesca y silvicultura, representan el 3.9% del Producto Interno Bruto (PIB) de la nación, el cual alcanzó 588,944 millones de pesos mexicanos durante el 2022 [12, 13]. En la Figura 2, se presenta la distribución ganadera de México por Estados y el inventario de cabezas de ganado en 2022 [14].

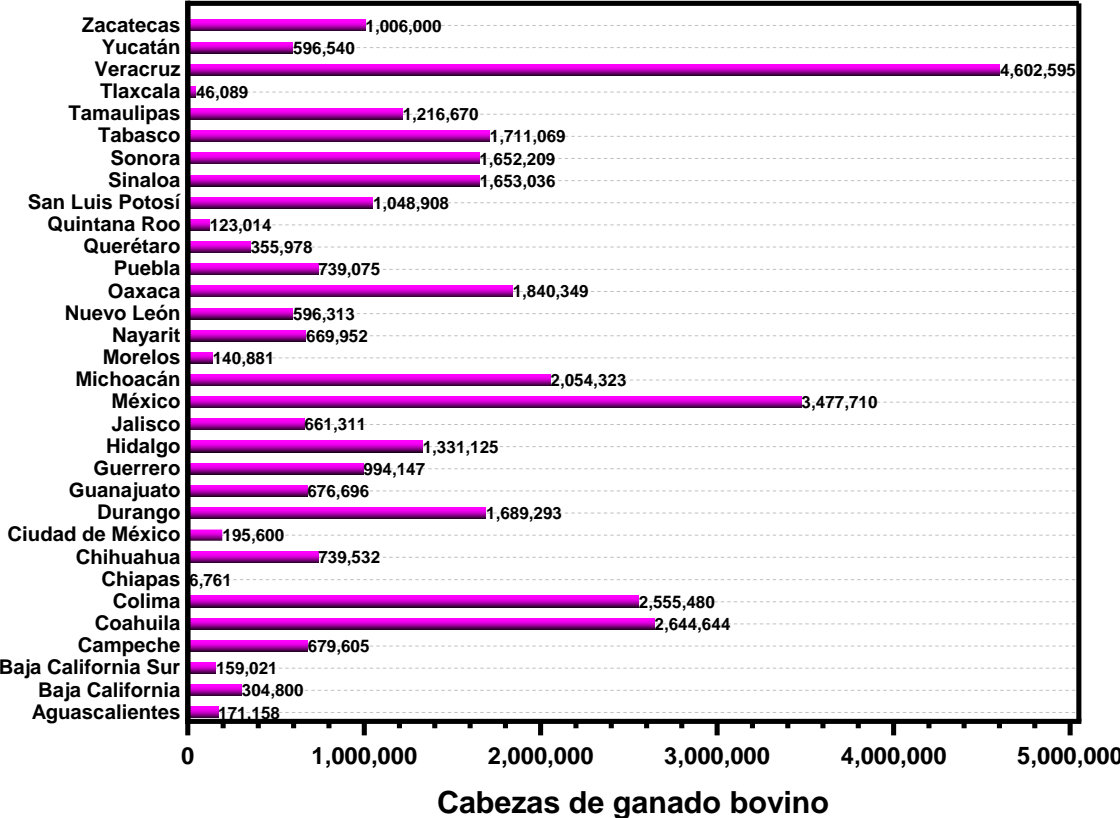


Figura 2. Inventario de ganado bovino de México por Estado [14].

El inventario ganadero de Baja California asciende a 300,000 cabezas de ganado bovinos, de las cuales 248,347 tenían como finalidad la producción de carne y 43,550 la producción de leche [14]. En 2022, la explotación ganadera produjo 209,121 litros de leche y 111,571 t de carne [15]. Este nivel de producción ha generado beneficios económicos superiores a 6,340 millones de pesos en el caso de la carne y 867 millones de pesos en el caso de la producción de leche [16,17].

En Baja California, la ganadería bovina se desarrolla en dos grandes zonas de producción: zona costa y valle de Mexicali. Cada zona se ha especializado en un área particular de producción. La zona costa que corresponde al municipio de Ensenada, se ha especializado en la producción de leche, y representa el 85 % de la producción lechera estatal. Mientras que el valle de Mexicali, correspondiente al municipio de Mexicali, se ha especializado en la producción de carne, alcanzando una producción que representa el 90 % de la producción cárnica estatal [18]. La ganadería de engorda es especialmente importante en el valle de Mexicali, debido al impacto significativo sobre la economía de la región. Esta actividad económica participa con el 28.2 % del PIB Agropecuario Estatal, el 38.9 % del PIB Municipal y representa el 78 % del total de la producción pecuaria de Baja California [19].

Además de proporcionar alimento y beneficios económicos, la ganadería intensiva plantea retos puntuales en materia de sustentabilidad y medio ambiente. El efecto principal de la ganadería sobre el medio ambiente se puede observar en las emisiones significativas de GEI, las cuales contribuyen al calentamiento global. De acuerdo con la FAO, las emisiones agrícolas y ganaderas se estiman en 5,335 Mt de CO₂-eq, a nivel mundial [20]. Estas emisiones incluyen la fermentación entérica, manejo de estiércol, cultivo de arroz, fertilizantes sintéticos, descomposición de residuos de cultivo, quema de residuos, etc. En la Figura 3 se presentan las emisiones de gases de efecto invernadero de origen agropecuario a nivel mundial.

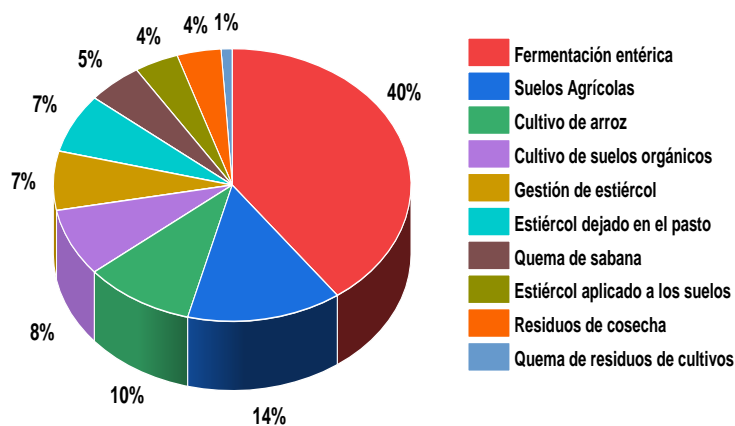


Figura 3. Fuentes de emisión de la ganadería y la agricultura [20]

Entre las emisiones agropecuarias se destaca la fermentación entérica con una contribución equivalente a 2,071 Mt CO₂-eq, la cual representa el 40 % de las emisiones de este sector agropecuario a nivel mundial. Por otra parte, se tiene el manejo de estiércol, con una generación equivalente a 361 Mt CO₂-eq y representa el 7 % de las emisiones [20]. En cuanto a México, las emisiones por fermentación entérica y manejo de estiércol son alrededor de 64,402.7 kt CO₂-eq y 2,369.8 kt CO₂-eq, respectivamente [21]. En Baja California, las emisiones anuales producto de la fermentación entérica y manejo de estiércol se han estimado en 269 kt CO₂-eq y 146 kt CO₂-eq, respectivamente [22, 23]. El estiércol es un residuo abundante de la industria ganadera, con alto contenido de materia orgánica y carbono. En la Tabla 1 se presentan las características del estiércol bovino reportadas en la literatura [24, 25].

Tabla 1. Características del estiércol bovino

Características	[24]	[25]
Sólidos totales	20.93 g/kg	18.70 %
Cenizas	1.53 g/kg	23.80 %
Contenido de humedad	---	81.30 %
Sólidos volátiles	19.40 g/kg	76.20 %
Contenido de sustancias orgánicas	92.69%	---
pH	7.16	7.60
DQO*	8,000 mg O ₂ /L	---
Ácidos grasos volátiles	1,691 mg/L	---
Nitrógeno amoniacal	166.1 mg N-NH ₄ /L	---
Alcalinidad	162.8 mval/L	---
Ortofosfatos	1,218 mgP-PO ₄ /L	---
C	36.05 % SV	21:1 proporción (C:N)
N	2.75 % SV	21:1 proporción (C:N)
Carbono orgánico total	---	37.50%
Nitrógeno total Kjeldahl	---	1.78%

*SV-Sólidos volátiles. *DQO- Demanda química de oxígeno.

Se han propuesto diversas aplicaciones para el aprovechamiento productivo del estiércol ganadero. Entre las aplicaciones más sobresalientes se destacan el compostaje y la digestión anaerobia. El compostaje permite transformar el estiércol en un fertilizante con importantes propiedades para el suelo y el crecimiento de las plantas. Por otra parte, los procesos de digestión anaerobia permiten transformar el estiércol en biogás, el cual es un combustible que facilita la producción de energía eléctrica y térmica. Cada una de las alternativas mencionadas presenta sus propias ventajas y desventajas, sin embargo, la digestión anaerobia tiene una ventaja respecto al compostaje [26]. El proceso de digestión anaerobia permite obtener un segundo producto de valor agregado, el cual es fertilizante con alto contenido de nutrientes que puede ayudar a disminuir los costos de operación en la producción de biogás y disminuir el consumo de fertilizantes sintéticos [27].

La generación de energía térmica pasó de 21,342 TJ a 50,648 TJ, entre 2012 y 2019, respectivamente. En este mismo periodo la generación de energía eléctrica pasó de 64,926 GWh a 88,751 GWh. Entre las fuentes renovables se encuentra el biogás, el cual participó en la producción de energía primaria con 2.8 PJ y fue equivalente al 0.04% de la producción de energía primaria en el país [28]. En 2022, se generaron alrededor de 347 GWh a partir del biogás en México. La información de la cantidad de energía térmica generada por biogás no está disponible [29].

2.2.2. Residuos de la agricultura; cultivos algodóneros

La agricultura promueve los alimentos nutritivos, que sean de acceso para todos y sea sustentable, además gestiona los recursos naturales con la finalidad de preservar los ecosistemas, el aumento de la productividad y satisfacer las necesidades humanas. De esta actividad se obtienen muchos beneficios como el uso de los recursos de la tierra de la cual se producen bienes, aumento en la productividad económica y generación de empleo. En el contexto internacional, los principales países productores de algodón son India, Estados Unidos de América y China. La Figura 4, presenta los diez primeros países productores de algodón y

México, de acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) [30].

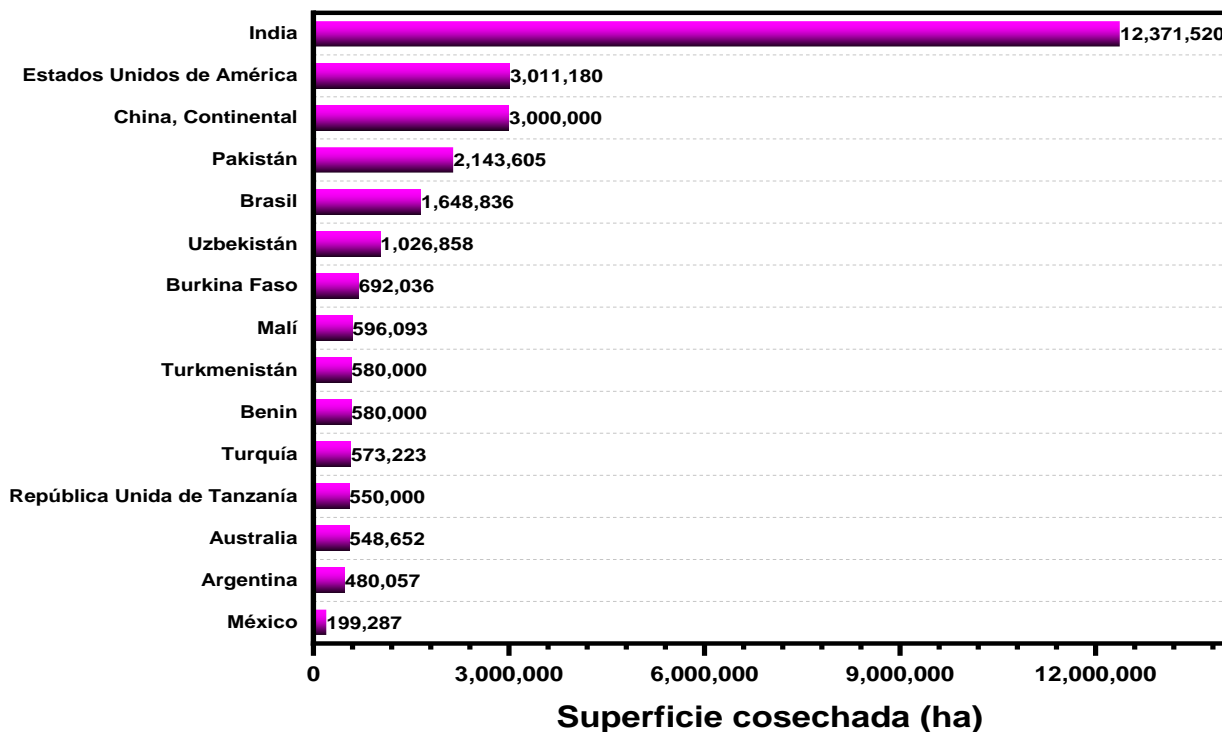


Figura 4. Superficie cosechada de algodón en el mundo en 2022 [30].

México, es el tercer país de Latinoamérica con mayor de cosecha de algodón. En 2022, se cosecharon 189,287 ha de algodón, la producción de algodón fue de 871,955 t y se estima que se generaron alrededor de 1,307,932.5 t de vara de algodón [31]. En la Figura 5, se ilustra la distribución de superficie cosechada en México por Estado en 2022.

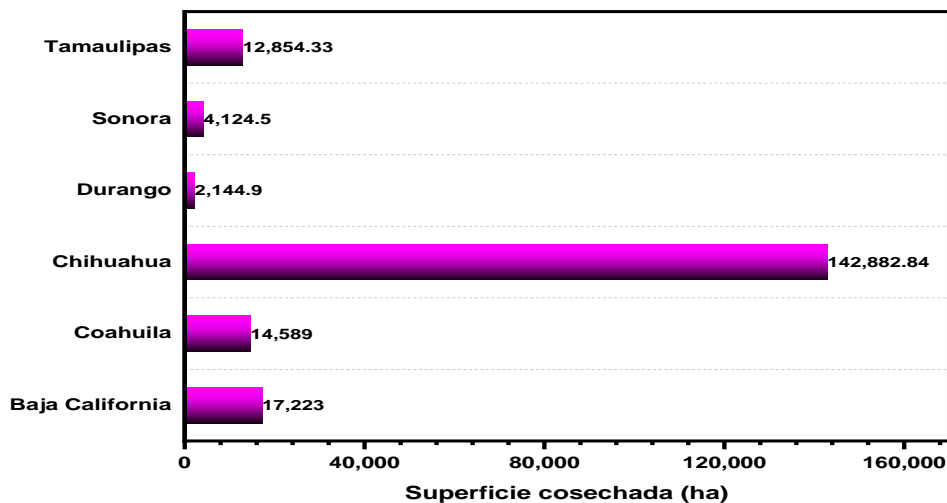


Figura 5. Inventario de cosecha de algodón en México por Estado [31].

En 2022, el inventario de la superficie de cosecha de algodón en Baja California ascendió las 17,200 hectáreas, ocupando el segundo lugar a nivel nacional. El cultivo de algodón produjo más de 78,700 t y se estima que se generó alrededor de 118,050 t de vara de algodón lo que corresponde al 9.5 % de este residuo agrícola en México. El cultivo de algodón se ubica especialmente en el valle de Mexicali, razón por la cual genera un impacto significativo en la región, debido a que la industria de este producto se centra en los textiles, también se ocupa para material de curación, tapicería, papel moneda y esto genera beneficios económicos [32].

Sin embargo, la vara de algodón generada de los cultivos de algodón representa un subproducto agrícola residual que permanece en el campo tras la cosecha, siendo abundante, pero con escaso valor económico. Actualmente, la mayoría de las varas se consideran desechos y se gestionan retirándolos de los campos, enterrándolos o incinerándolos para prevenir posibles infestaciones de plagas en el futuro [33].

Por tanto, la vara de algodón es un residuo abundante de la agricultura en Baja California, con alto contenido de materia seca y carbono. En la Tabla 2 se presentan las características de la vara de algodón reportadas en la literatura [33, 34].

Tabla 2. Características de la vara de algodón

Características	[33]	[34]
Almidón	1.25 %	---
Proteína	6 %	7.45 %
Grasa	0.7 %	---
Nitrógeno total	0.88 %	0.79 %
Sólidos volátiles	91.6 %	82.12 %
Materia seca	95.2 %	96.35 %
Azúcar	4.3 %	28.4 %
Fibra cruda	45.7 %	8.44 %
Humedad	4.8 %	3.65 %
C	55.8 %	58.63 %
Celulosa	----	39.56 %
Lignina	----	22.35 %
Hemicelulosa	----	19.85 %

Con base en las características citadas y superficie cosechada de vara de algodón, este residuo se vuelve atractivo como materia prima en la producción de biogás. Investigaciones anteriores sugieren que la codigestión de residuos de cultivos con estiércol animal puede mejorar los rendimientos de biogás. No obstante, los aumentos registrados en algunos estudios son considerablemente más significativos debido al impacto positivo de la incorporación de residuos de tallos de algodón en la producción volumétrica de biogás [35]. Por lo cual, la utilización de tallos de algodón en la producción de biogás se ha visto prometedora. Sin embargo, debido a la resistencia inherente del tallo de algodón como biomasa lignocelulósica, se considera que la hidrólisis es la etapa limitante de velocidad, lo que disminuye la eficiencia de la conversión biológica del componente orgánico en biogás. Por lo tanto, es necesario someter previamente los sustratos lignocelulósicos a un tratamiento para aumentar la superficie de ataque enzimático y mejorar la biodegradabilidad antes de la etapa de bioconversión [36].

2.3. Proceso de la digestión

La población microbiana desempeña un papel clave en la transformación de los residuos, adaptándose a condiciones con o sin oxígeno facilitando la digestión de diversos desechos orgánicos [37].

2.3.1. Digestión aeróbica

La digestión aeróbica es un proceso biológico en el que microorganismos, con suministro constante de aire, descomponen la materia orgánica de diversos residuos, incluidos aguas residuales y desechos sólidos orgánicos, hasta alcanzar una estabilidad mínima de la materia orgánica [37].

2.3.2. Digestión anaeróbica

La digestión anaeróbica es un proceso bioquímico en el que se convierte materia orgánica con la interacción de microorganismos en ausencia de oxígeno en biogás, principalmente metano, con la ventaja adicional de generar un subproducto valioso: fertilizante [38].

2.3.3. Fases de la digestión anaerobia para la producción de biogás

La digestión anaerobia se lleva a cabo por la acción de una serie de microorganismos que realizan múltiples reacciones bioquímicas complejas. Estas reacciones ocurren en su gran mayoría de forma simultánea y en ausencia total de oxígeno [39]. Se han identificado cuatro fases para la producción de biogás mediante digestión anaerobia. En la Figura 6, se ilustran las fases involucradas en la digestión anaerobia para la producción de biogás.

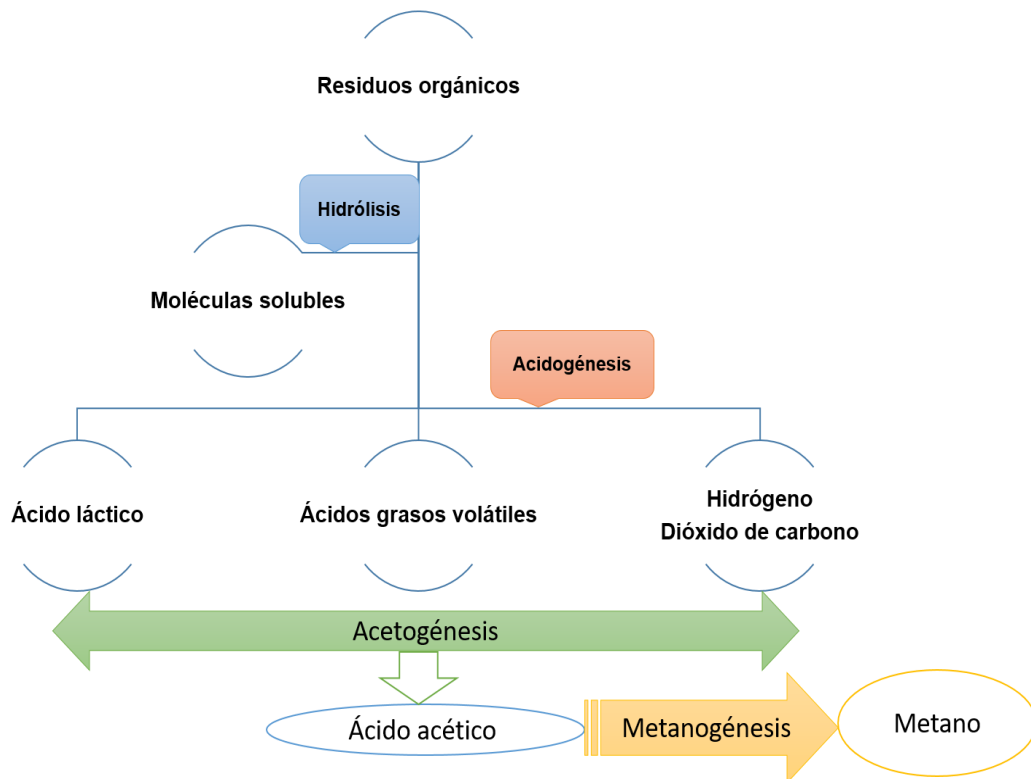


Figura 6. Fases de la digestión anaerobia por elaboración propia.

A continuación, en la Tabla 3 se presentan los principales microorganismos involucrados y se describen las fases del dicho proceso anaeróbico [40, 41].

Tabla 3. Microorganismos en la digestión anaerobia del estiércol

Etapa	Nombre	Bacterias o microorganismos
1	Hidrólisis	<i>Bacteroides</i> , <i>Lactobacillus</i> , <i>Propioni-bacterium</i> , <i>Sphingomonas</i> , <i>Sporobacterium</i> , <i>Megasphaera</i> , <i>Bifidobacterium</i>
2	Acidogénesis	<i>Clostridium</i> , <i>Paenibacillus</i> , <i>Ruminococcus</i> , <i>Cytophaga</i> <i>Flavobacterium</i> <i>Bacteroides</i>
3	Acetogénesis	Bacterias acetogénicas reductoras de sulfato
4	Metanogénesis	Arqueas metanogénicas, <i>Methanobacterium</i> , <i>Methanospirillum hungatii</i> y <i>Methanosarcina</i> .

2.3.3.1. Hidrólisis

En esta primera etapa, las moléculas complejas son hidrolizadas por enzimas extracelulares producidas por microorganismos. Como resultado se obtienen moléculas solubles más sencillas y solubles en medio acuoso, de tal forma que pueden atravesar la pared celular de los microorganismos [42]

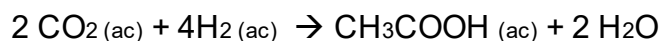
2.3.3.2. Acidogénesis

Esta etapa es importante porque es donde ocurre la eliminación total de oxígeno disuelto en el sistema y se producen las sustancias que las bacterias usarán en la etapa posterior

En esta etapa las bacterias facultativas y anaeróbicas obligadas, actúan sobre las moléculas solubles obtenidas de la hidrólisis para llevar a cabo la fermentación. Como resultado se generan los ácidos: propiónico, butírico, valérico y láctico; dióxido de carbono, hidrógeno, amonio, ácidos grasos volátiles [43].

2.3.3.3. Acetogénesis

Los procesos metabólicos que intervienen en esta etapa se encargan de transformar los ácidos grasos volátiles en ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno. El dióxido de carbono y el hidrógeno son reducidos por la acción de bacterias acidogénicas para obtener el ácido acético, como se muestra en la siguiente reacción [44]:



2.3.3.4. Metanogénesis

En esta etapa se produce metano como producto final. La acetoclástica, es donde el sustrato (acetato) contribuye al crecimiento de los microorganismos y la generación de metano y la hidrogenotrófica, donde los sustratos CO_2 y H_2 contribuyen al crecimiento de microorganismos y la generación de metano. Las reacciones que tienen lugar en esta etapa se muestran a continuación [45]:



2.4. Parámetros y variables asociadas a la biodigestión

Varios parámetros fisicoquímicos son útiles para medir y controlar el proceso de biodigestión. Gran parte de los parámetros dependen del diseño del reactor y las características de la materia prima, algunos de estos parámetros son: sólidos disueltos, materia orgánica, ácidos grasos, alcalinidad, entre otros. Por otra parte, existen otros parámetros que son de importancia en la digestión anaerobia. Estos parámetros están relacionados con la temperatura y el pH que requieren los microorganismos para crecer y llevar a cabo las reacciones bioquímicas que dan lugar a la generación de biogás. En las Tablas 4 y 5 se presentan la temperatura y el pH necesario para el desarrollo de los microorganismos involucrados en el proceso de biodigestión [46].

Tabla 4. Temperatura de los microorganismos de la digestión anaerobia

Temperatura (°C)	Tipo de microorganismo	Microorganismos
10-15	Psicrófilos Bacillus	<i>Spp</i>
20-30	Psicrótrofos	<i>Clostridium spp</i>
30-37	Mesófilos	<i>Clostridium spp Methanococcus spp Methanobacterium spp</i>
42-46	Termótrofos	<i>Methanococcus spp Methanobacterium spp</i>
50-80	Termófilos	<i>Clostridium spp Lactobacillus spp Thermus spp Thermococcus spp</i>

Tabla 5. pH de los microorganismos de la digestión anaerobia

pH	Tipo de microorganismo	Microorganismos
1.1 – 5.5	Acidófilos	<i>Lactobacillus spp Bifidobacterium bifidum</i>
5.5 – 8.0	Neutrófilos	<i>Clostridium perfringes Methanococcus sp Methanobacterium sp Propionibacterium acidipropionici</i>
8.5 – 11.5	Alcalonófilos	<i>Clostridium botulinum Clostridium sporogenes Clostridium tetani Fusobacterium spp Micrococcus spp</i>

2.5. Beneficios ambientales de la biodigestión anaeróbica

El biogás, como recurso renovable derivado de la biomasa, presenta ventajas económicas, ambientales y energéticas. Su producción, especialmente a través de tecnologías de digestión anaeróbica, ofrece incentivos económicos para agricultores, mejor gestión de nutrientes, reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y captura de biogás [47].

2.6. Factores determinantes en el proceso de producción de biogás

2.6.1. Naturaleza y composición bioquímica de materias primas

La eficacia de la actividad microbiana en sistemas anaeróbicos se halla condicionada por la presencia de fuentes carbonadas, nitrogenadas y sales minerales esenciales, tales como azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, y otros. Estiércoles y lodos contienen estos elementos en proporciones adecuadas, ciertos desechos industriales pueden requerir la suplementación de compuestos o la implementación de un tratamiento aeróbico. Sin embargo, un elevado contenido de lignina demanda pretratamientos destinados a liberar las sustancias susceptibles de transformación y la degradación de estiércoles está intrínsecamente vinculada al tipo de animal y su régimen alimentario [48].

2.6.2. Relación carbono/nitrógeno de las materias primas

Las bacterias metanogénicas dependen del carbono como fuente de energía y del nitrógeno para la síntesis celular, siendo la relación óptima entre ambos de 30:1 hasta 20:1. Este equilibrio favorece el crecimiento bacteriano ya que estas bacterias consumen 30 veces más carbono que nitrógeno [49].

2.6.3. Niveles de sólidos totales y sólidos volátiles

La proporción de sólidos totales (ST) en la materia orgánica es crítica para la eficacia de la digestión anaeróbica. En digestores semicontinuos, se ha evidenciado experimentalmente que mantener los sólidos totales en un rango de 8 % a 12 % es fundamental para el buen funcionamiento del proceso. En contraste, los

biodigestores discontinuos pueden manejar niveles de sólidos totales entre el 40 % y 60 %, según investigaciones [50].

2.6.4. Temperatura

Los procesos anaeróbicos, exhiben una marcada dependencia de las condiciones térmicas. Las variaciones térmicas estacionales afectan adversamente la producción de biogás, la estabilidad y la eficiencia de la digestión anaeróbica, resultando en una reducción de hasta el 80 % en la producción de biogás a 25.5 °C, en comparación con condiciones mesófilas óptimas de 35 a 38 °C [51]. En otro estudio, se encontró que la efectividad de las bacterias metanogénicas está condicionada por la temperatura de operación, siendo óptima en un rango termófilo de 50 a 60 °C para la producción de biogás en comparación con una temperatura mesófila [52].

2.6.5. Tiempo de retención hidráulico (TRH) y velocidad de carga orgánica

El tiempo de retención indica la cantidad de días de la digestión anaerobia, en algunos estudios es de 35 días. Esta presenta una dependencia significativa de la temperatura, disminuyendo proporcionalmente a mayores temperaturas, lo que optimiza la eficiencia en la producción de biogás [53].

2.6.6. Rangos de pH y alcalinidad

El pH presente en el digestor no solo regula la generación de biogás, sino que también influye en su composición. Un estudio examinó los impactos de mantener un pH constante (pH 6-8) en la generación de biogás y la comunidad microbiana durante la fermentación anaeróbica del estiércol. Un pH ajustado a 7.0 mejora tanto la producción de biogás por parte de los metanógenos como su consumo de carbono orgánico [54]. Por otra parte, ajustar el pH en el sistema de digestión anaeróbica termofílica podría ser beneficioso para los metanógenos y mejorar la producción de biogás al favorecer la utilización de ácidos orgánicos acumulados. Además, este ajuste podría potenciar las actividades enzimáticas microbianas, mejorando la hidrólisis del sustrato y el proceso metanogénico [55].

2.6.7. Ácidos grasos volátiles

La concentración de ácidos grasos volátiles es clave en la digestión anaeróbica, debido a que es crucial para el proceso de producción de biogás. La acumulación de ácidos grasos volátiles, como ácidos acético, propiónico y butírico, puede ocurrir debido a la ruptura de la relación simbiótica entre acidogénicos y metanogénicos, inhibiendo las bacterias metanogénicas y afectando negativamente la producción de biogás [56].

2.6.8. Nitrógeno

El nitrógeno amoniacal, formado por el ión amonio (NH_4^+) y el amoníaco (NH_3), se encuentra en equilibrio químico, siendo la concentración relativa de cada especie dependiente del pH, según la ecuación de equilibrio $\text{NH}_4^+ \rightleftharpoons \text{NH}_3 + \text{H}^+$. Se ha evidenciado que el amoníaco libre, aumenta el pH a alcalino, esto exhibe un efecto inhibitorio en el proceso de digestión anaeróbica [57].

2.7. Promotores de la metanogénesis

2.7.1. Inoculantes biológicos

El desarrollo bacteriano en los digestores sigue tres fases: arranque (I), estabilización (II) y declinación (III). La incorporación de material de otro biodigestor con bacterias metanogénicas activas puede reducir la fase de arranque, especialmente en biodigestores discontinuos, mejorando así la eficiencia del proceso y la producción de biogás por kilogramo de residuo. La eficacia del inóculo se ve afectada por la proporción y la edad de este, siendo más efectivo con proporciones mayores y edades más jóvenes [58].

2.7.2. Agitación

La agitación en un biodigestor conlleva ventajas como el incremento de la producción de biogás, una mayor estabilidad del proceso, una mejora en la eliminación de materia orgánica y la reducción del tiempo de retención hidráulico, siendo estas mejoras atribuibles a dos razones esenciales: lograr una distribución uniforme de temperatura y homogeneidad en la distribución de la mezcla [59].

2.8. Tipos de biodigestores

Un biodigestor es un contenedor cerrado, hermético con accesorios adheridos, cuya finalidad es llevar a cabo el proceso de la digestión anaerobia. Para ello el biodigestor consta de varios componentes entre ellos se encuentran la materia prima, el contenedor de gas, accesorios para salida de biogás, zona de carga de materia prima y salida del efluente líquido.

En la actualidad existen diferentes tipos de reactores para la digestión anaerobia de residuos orgánicos. A continuación, se presentan los modelos más utilizados [60, 61].

2.8.1. Modelo Chino

Estos digestores se construyen totalmente enterrados y tienen forma cilíndrica con el techo en forma de domo. Son reactores semicontinuos, los cuales son llenados con materia agrícola compostada mezclada con agua. Una vez se estabiliza la producción de biogás son alimentados diariamente con residuos disponibles provenientes de animales. El efluente sólido se extrae y se aplica a los campos de cultivos. Su desventaja es la poca eficiencia en la generación de biogás, pero es un excelente medio de producción en biofertilizante. Estos se construyen en un lugar con materiales rígidos, como ladrillos u hormigón, tienen generalmente mayor firmeza y resistencia que otros y se le puede acoplar sistemas de agitación de una manera fácil. Figura 7, es estático debido a que su transporte se hace difícil [60]



Figura 7. Biodigestor tipo chino. [60]

2.8.2. Modelo Indio

Estos digestores se construyen generalmente enterrados y tiene forma vertical parecida a un pozo. Son reactores semicontinuos y se alimentan una vez al día por acción de gravedad. La producción de biogás depende del tiempo de fermentación y el volumen de mezcla que se adiciona. Uno de los efluentes producidos fluye según el sistema por una pileta hasta el exterior para aplicarlo a los cultivos (Figura 8). Presenta una buena eficiencia en la producción de biogás comparada con otros reactores. Generalmente opera a presión de biogás constante lo que facilita el uso del biodigestor mediante la incorporación de una cubierta móvil [61].

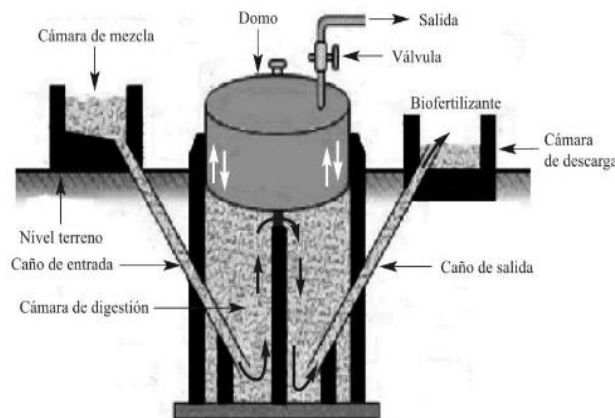


Figura 8. Biodigestor tipo indio [61].

2.8.3. Digestores Horizontales

Estos digestores son semicontinuos, se construyen enterrados de manera horizontal en forma de un canal. La carga del material orgánico entra por un extremo y la salida de los productos se da por el extremo opuesto. Son reactores de fácil instalación y presentan buenos rendimientos de producción de biogás, son ampliamente utilizados en las granjas para generar energía térmica y cocer alimentos. Tienen características alargadas en forma de tubo y los más conocidos están hechos de policloruro de vinilo (PVC), particularmente son de fácil instalación y movilidad (Figura 9). El sistema debe tener ciertos criterios tales como el grosor de la membrana, el cual debe ser mayor a 0.80 mm y el tipo de aditivos utilizados

en su creación para garantizar la resistencia de químicos externos y de los rayos solares [60].



Figura 9. Biodigestor tipo horizontal [60].

2.8.4. Digestor Batch

Este digestor es discontinuo y está diseñado en forma de tanque hermético, se conecta a un gasómetro flotante en donde se recolecta el biogás producido. La materia prima se carga por lotes y al finalizar la producción de biogás se realiza el descargo. Normalmente son usados a escala laboratorio para conocer si un sustrato es apto o no para la producción de biogás (Figura 10). Esto se hace para determinar el tiempo de retención, el potencial de producción y cuánto se produce de biogás [61].





Figura 10. Digestor tipo batch [61].

2.9. Estado de la técnica sobre biodigestores

2.9.1. Biodigestores actuales reportados en la literatura

Los resultados de búsqueda de los biodigestores reportados en artículos de investigación se presentan en la Tabla 6. Se muestran los biodigestores diseñados en diferentes escalas y condiciones de operación, parámetros establecidos y algunas características. Los ajustes presentados por los biodigestores dependen de su diseño, modelo y escalas de operación. Todos son sellados herméticamente y poseen características diferentes como la zona de carga de materia prima, la zona de salida del efluente o el sistema de agitación como se ilustra en el Esquema 4. El digester horizontal con aspas reporta una mayor eficiencia en el sistema de la biometización comparados con los demás.

Tabla 6. Biodigestores reportados en la literatura.

#	Esquema del digester	Novedad	Año/Ref.
1		Reactor a escala de laboratorio de una codigestión anaeróbica termofílica lograron demostrar la eficiencia del sistema en la degradación en la adición de lípidos en un periodo de 600 días.	2022/ [62]
2		Biodigestor anaerobio a escala laboratorio basado en el modelo indio, el cual cuenta con una tecnología fácil y eficiente para el tratamiento de residuos.	2021/ [63]

3



Reactor a escala de laboratorio de biometización sellado totalmente con una tapa de teflón conectado con un manómetro y una tubería de salida.

2021/ [64]

4



Reactor horizontal de acero inoxidable a escala laboratorio con agitador en forma de espas, sellado herméticamente para evitar la entrada de oxígeno y luz.

2020/ [65]

5



Reactor anaeróbico a escala real con costos de implementación y operación bajos. En este se incorpora un diseño de calefacción solar pasiva.

2019/ [66]

6



Biodigestor alternativo a escala piloto construido con material plástico reciclado, se dispusieron de manera horizontal con conexiones a los extremos para la salida de los productos.

2019/ [67]

Los biodigestores reportados se encuentran en dos escalas diferentes. Una es la escala laboratorio, la cual se utiliza para estudiar ciertos parámetros del proceso de digestión utilizando pequeñas cantidades de sustratos y su implementación es sencilla y económica, en cambio, la escala piloto se utiliza para hacer estudios del proceso, posibles restricciones y con mayores cantidades de sustrato. El reactor horizontal con agitador en forma de aspas es el más fácil y eficiente de implementar por su operación de uso y alta producción de biogás cercana al 82 % de metano en la estabilización lograda en 120 días (Esquema 5). Este reactor es más práctico, en términos de producción es muy superior en comparación con los demás los cuales alcanzaron producciones de biogás alrededor del 65 %. Este dispositivo consta de una capacidad neta de 42.86 L y fue diseñado en acero inoxidable, su sellado es hermético para evitar la entrada de luz y oxígeno para no ocasionar daños en la actividad microbiana participante de la digestión anaerobia. Con respecto a los reactores representados en los Esquemas 1 y 2, implementaron el modelo indiano reportado en el apartado 2.8.2., los cuales son verticales y su operación es semicontinua. Cada uno presenta ventajas a nivel laboratorio, para el Esquema 1, se elaboró con un tanque con capacidad para 12 L con agitación continua y se equipó con un sistema de camisa de agua para mantener su temperatura constante, además se encontraron ciertos parámetros de estabilidad en la codigestión anaerobia como la adición de oligoelementos y pH mayor a 7.7. En el caso del Esquema 2, se diseñó el reactor en acero inoxidable y su capacidad útil fue de 120

L, este consta de un sistema de fácil manejo y un tratamiento eficaz de los sustratos y digestatos.

Para el reactor representado en el Esquema 3, se basó en el modelo Batch, el cual está descrito en el apartado 2.8.4., este consta de un sistema discontinuo, la materia prima se carga por días y su efluente se descarga al finalizar el proceso de producción de biogás. Para lograr una eficiencia de biometización cercana al 63 %, se basaron en un modelo mecanicista simple por medio de la cinética de Contois.

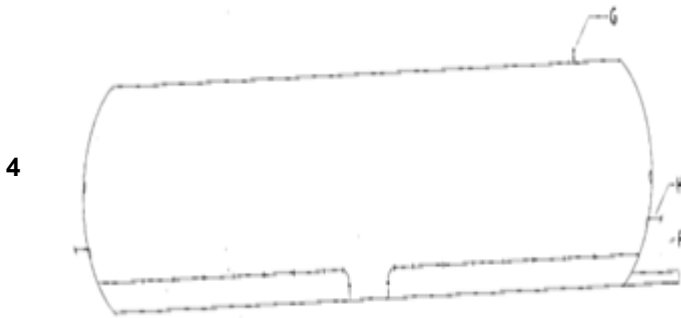
En las pruebas piloto, el reactor más eficiente en cuanto ahorro y producción es el representado en el Esquema 5, el cual consta de bolsas plásticas resistentes que fueron colocadas en una zanja con ciertas dimensiones específicas en el suelo. Este reactor se dejó en operación durante todo un año a condiciones reales de temperatura y presión y sin tener en cuenta ciertos parámetros de pretratamiento de muestra, ni dilución, ni agitación, con una novedad que el calentamiento fue solar pasivo, logrando una eficiencia en el sistema de generación de biogás del 65%. Para el reactor del Esquema 6, se puede mencionar como ventaja los materiales usados para la creación del reactor, los cuales fueron tanques de capacidad de 50 L y mangueras de plásticos reciclados. Esto genera un impacto positivo al medio ambiente, además de su alta eficiencia obtenida en la producción de biogás.

2.9.2. Biodigestores y métodos reportados en patentes

En la actualidad se buscan tecnologías y creaciones de sistemas que ayuden a mejorar el impacto ambiental ocasionado con residuos orgánicos. La generación de biogás a partir de estos residuos es una solución global como energía limpia para reducir la contaminación y gases de efecto invernadero ocasionados por la quema de residuos. La generación de biogás requiere de reactores y ciertos métodos como los que están descritos en la Tabla 7.

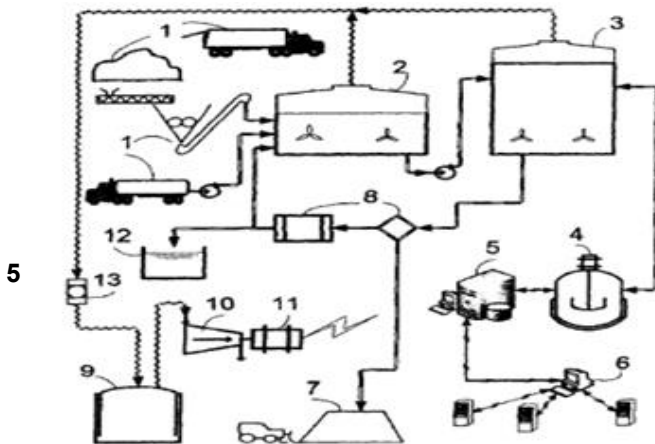
Tabla 7. Biodigestores y métodos reportados en patentes

#	Esquema del digester o sistema	Novedad	Año/Ref.
1		<p>Es una solicitud de patente internacional sobre una invención de un biodigestor compacto para la generación de biogás y fertilizante usando residuos domésticos.</p>	<p>2022/ [68]</p>
2		<p>Es una solicitud internacional de patente, el cual describe un método y pasos para crear con unas plantillas de membranas un reactor biodigestor.</p>	<p>2019/ [69]</p>
3		<p>Solicitud de patente internacional que abarca un dispositivo que genera biogás utilizando purines de ganado, por medio de una serie de tanques el cual se llevan a cabo procesos de calentamiento y reposo.</p>	<p>2018/ [70]</p>



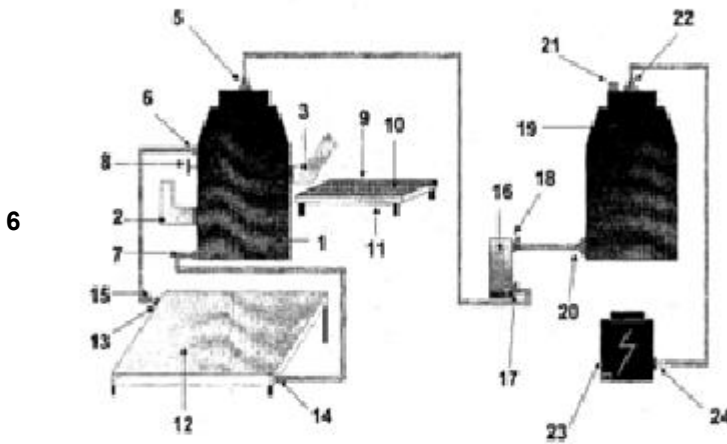
Solicitud de patente europea que consta de un reactor anaeróbico de flujo continuo para la generación de biogás utilizando materia orgánica como sustrato.

2014/
[71]



Pedido internacional de patente, que consiste en un proceso para mejorar la producción de biogás con la finalidad de generar energía eléctrica, usando biotecnologías, hardware y software para este propósito.

2013/
[72]



Solicitud internacional de patente, que consta de un sistema de biodigestor para la producción de biogás utilizando residuos de animales.

2013/
[73]

2.10. Rendimientos de biogás de acuerdo con la biomasa

Los rendimientos del biogás dependen de múltiples factores, sin embargo, se han reportado los rendimientos promedio de biogás cuando se utiliza como materia prima estiércol animal. En la Tabla 8 se presentan los rendimientos de biogás con respecto al tipo de estiércol utilizado [74].

Tabla 8. Rendimientos de producción de metano

Origen	*Rendimiento de biogás (m³/t)
Estiércol Bovino	40 – 60
Estiércol de Ave	25 – 30
Estiércol Porcino	60 – 80

*metros cúbicos por tonelada de materia

2.11. Características fisicoquímicas del biogás

Las características fisicoquímicas del biogás dependen de las condiciones de operación y las características del estiércol utilizado. En la Tabla 9 se presentan los resultados de investigaciones recientes sobre la composición del biogás a partir de la digestión anaerobia del estiércol bovino [75].

Tabla 9. Composición química del biogás

Componente	Fórmula	Porcentaje
Metano	CH ₄	40-70
Dióxido de carbono	CO ₂	30.60
Hidrógeno	H ₂	0.1
Nitrógeno	N ₂	0.5
Monóxido de carbono	CO	0.1
Oxígeno	O ₂	0.1
Sulfuro de hidrógeno	H ₂ S	0.1

2.12. Características fisicoquímicas del fertilizante

Una de las características principales del biofertilizante obtenido de la digestión anaerobia, es su alto contenido de macronutrientes y minerales que mejoran la calidad del suelo. La cantidad de los nutrientes en el biofertilizante es muy variable. Para el estiércol bovino se han reportado: 39.9 % carbono, 23.6 % nitrógeno, 46 % cenizas, 2.37 % fosfato [76].

Referencias

- [22] Daniel Fernández, Ana Ferreira, Edgar C. Fernández, Biogas and biomethane production potential via anaerobic digestion of manure: A case study of Portugal, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 188, December 2023.
- [2] Aparicio, E., Rodríguez-Jasso, R. M., Lara, A., Loredó-Treviño, A., Aguilar, C. N., Kostas, E. T., & Ruiz, H. A. (2020). Biofuels production of third generation biorefinery from macroalgal biomass in the Mexican context: An overview. *Sustainable seaweed technologies*, 393-446.
- [3] Borines, M.G., McHenry, M.P., de Leon, R.L., 2012. Integrated macroalgae production for sustainable bioethanol, aquaculture and agriculture in Pacific Island nation. *Biofuels Bioprod. Biorefin.* 6, 246–256. <https://doi.org/10.1002/bbb.310>.
- [4] Silva, T.A.L., Zamora, H.D.Z., Varão, L.H.R., et al., 2017. Effect of steam explosion pretreatment catalysed by organic acid and alkali on chemical and structural properties and enzymatic hydrolysis of sugarcane bagasse. *Waste Biomass Valoriz.* 9, 2191–2201. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-9989-7>.
- [5] AW Bhutto, K. Qureshi, R. Abro, K. Harijan, Z. Zhao, AA Bazmi, T. Abbas, G. Yu. *Progresos en la producción de biocombustibles líquidos para descarbonizar el sector del transporte: perspectivas y desafíos.* 2016.
- [6] Hongjun Tian, Xiaowei Chen, Sayed Fayaz Ahmad, Manoj Kumar Agrawal, Asiful H. Seikh, Nehad Ali Shah, Qiaolin Su. Modeling and 4E analysis of a new combined cooling, heating, and power energy system based on biogas combustion and hot oil for heat supply. *Process Safety and Environmental Protection*. Volume 184, April 2024, Pages 1484-1501.
- [7] B. Ouhammou, A. Mohammed, S. Sliman, A. Jamil, B. Mohammed, F. Karouach, H. El Bari, T. Kousksou. Concepción experimental y análisis termoenergético de un sistema solar de producción de biogás.

- [8] S. Swami Nathan, J.M. Mallikarjuna, A. Ramesh. An experimental study of the biogas-diesel HCCI mode of engine operation. *Energy Convers. Manag*, 51 2010.
- [9] I. Ullah Khan, M. Hafiz Dzarfan Othman, H. Hashim, T. Matsuura, AF Ismail, M. Rezaei-DashtArzhandi, I. Wan Azelee. El biogás como combustible de energía renovable: una revisión de la mejora, utilización y almacenamiento del biogás. *Conversaciones de energía. Manag* , 150 (2017) , págs . 277-294 ,
- [10] Priyanka Yadav, Sudeep Yadav, Dhananjay Singh, Balendu Shekher Giri, P.K.Mishra, Barriers in biogas production from the organic fraction of municipal solid waste: A circular bioeconomy perspective, *Bioresource Technology*, Volume 362, October 2022, 127671.
- [11] FAO, 2022. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Visitado 3 enero del 2022 <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>.
- [12] SADER, 2022. Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural. Comportamiento del PIB agroalimentario. Visitado 6 enero del 2022. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/643090/Comportamiento_PIB_Agroalimentario_1er_trimestre_2021.pdf.
- [13] Banco Mundial, 2022. Agricultura y valor agregado. visitado el 6 enero 2022. <https://datos.bancomundial.org/indicador/NV.AGR.TOTL.KN?end=2020&locations=MX&start=1965>.
- [14] SIAP, 2021. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Gobierno de México. Visitado: 1 de octubre de 2021. <https://www.gob.mx/siap/documentos/poblacion-ganadera-136762?idiom=es>.
- [15] SIAP, 2021. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Gobierno de México. Visitado: 17 de octubre de 2021. <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-pecuaria>.

- [16] SADER, 2020. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Gobierno de México. Visitado el 5 de octubre de 2021. <https://www.gob.mx/agricultura%7Cbajacalifornia/articulos/la-produccion-de-carne-y-leche-de-ovino-en-baja-california>.
- [17] SEFOA, 2015. Secretaria de Fomento Agropecuario. Cuadernillo estadístico pecuario de Baja California. Gobierno del estado de Baja California. Visitado el 3 de octubre de 2021. http://www.oeidrus-bc.gob.mx/oeidrus_bca/pdf/cuaderno/Cuaderno%20Estad%C3%ADstico%20Pecuuario%20de%20BC%202011-2015.pdf.
- [18] SADER, 2020. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Gobierno de México. Visitado el 10 de octubre de 2021. <https://www.gob.mx/agricultura%7Cbajacalifornia/articulos/la-produccion-de-carne-y-leche-de-ovino-en-baja-california>.
- [19] SADER, 2020. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Gobierno de México. Visitado el 15 de octubre de 2021. <https://www.gob.mx/agricultura%7Cbajacalifornia/articulos/destaca-la-produccion-de-carne-de-ovino-en-el-sector-pecuario-de-baja-california>
- [20] FAO, 2021. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Agriculture, Forestry and Other Land Use Emissions by Sources and Removals by Sinks. Visitado el 2 de octubre de 2021. <https://www.fao.org/3/i3671e/i3671e.pdf>
- [21] FAO, 2022. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Visitado 3 enero del 2022. Estadísticas <https://www.fao.org/faostat/es/#data/GT>.
- [22] Meléndez, G. M., & González, L. B. V. (2013). Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero del sector agropecuario en Baja California. Sociedad y Ambiente, (2), 98-115. <https://revistas.ecosur.mx/sociedadambiente/index.php/sya/article/view/17>.

- [23] Secretaría de Protección al Ambiente del Estado de Baja California, 2005. Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero del estado de Baja California 2005. Visitado: 3 de octubre de 2021. http://www.spabc.gob.mx/wp-content/uploads/2018/05/inventario-de-emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-del-estado-de-baja-california-2005_centro-mario-molina_final-2007.pdf.
- [24] Bułkowska, K., Mikucka, W., & Pokój, T. (2022). Enhancement of biogas production from cattle manure using glycerine phase as a co-substrate in anaerobic digestion. *Fuel*, 317, 123456.
- [25] Abd Allah, W. E., Tawfik, M. A., Sagade, A. A., Gorjian, S., Metwally, K. A., & El-Shal, H. (2021). Methane production enhancement of a family-scale biogas digester using cattle manure and corn stover under cold climates. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 45, 101163.
- [26] Alfa, M. I., Adie, D. B., Igboro, S. B., Oranusi, U. S., Dahunsi, S. O., & Akali, D. M. (2014). Assessment of biofertilizer quality and health implications of anaerobic digestion effluent of cow dung and chicken droppings. *Renewable Energy*, 63, 681-686.
- [27] Arango-Osorio, S., Vasco Echeverri, O., López-Jiménez, G., González-Sánchez, J., & Isaac-Millán, I. (2019). Methodology for the design and economic assessment of anaerobic digestion plants to produce energy and biofertilizer from livestock waste. *Science of the total environment*, 685, 1169-1180.
- [28] IEA, 2022. International Energy Agency. Fuels and technologies, renewables. Visitado 3 marzo 2022. <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/renewables>.
- [29] SENER, 2022. Secretaria de energía de México. Balance nacional de energía del 2019. Visitado 3 de marzo 2022. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/618408/20210218_BNE.pdf.
- [30] FAO, 2022. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Visitado 5 septiembre del 2022. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>.

- [31] SIAP, 2022. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Gobierno de México. Visitado: 5 de octubre de 2022. https://nube.siap.gob.mx/avance_agricola/.
- [32] Hablemos del campo, <https://www.hablemosdelcampo.com/todo-sobre-el-algodon/>. Visitado: 10 de octubre de 2022.
- [33] Rafat Al Afif, Christoph Pfeifer, Enhancement of methane yield from cotton stalks by mechanical pre-treatment, Carbon Resources Conversion Volume 4, 2021, Pages 164-168.
- [34] Vipul R. Patel, Cost-effective sequential biogas and bioethanol production from the cotton stem waste, Process Safety and Environmental Protection Volume 111, October 2017, Pages 335-345.
- [35] P. Binod, M. Kuttiraja, M. Archana, K.U. Janu, R. Sindhu, R.K. Sukumaran, A. Pandey. High temperature pretreatment and hydrolysis of cotton stalk for producing sugars for bioethanol production. 2012.
- [36] L. Sun, P.B. Pope, V.G. Eijsink, A. Schnürer. Characterization of microbial community structure during continuous anaerobic digestion of straw and cow manure.
- [37] J. Ali, Y. Yang, G. Pan. Oxygen micro-nanobubbles for mitigating eutrophication induced sediment pollution in freshwater bodies. J. Environ. Manag. 2023.
- [38] N. Bhatnagar, D. Ryan, R. Murphy, A.M. Enright. A comprehensive review of green policy, anaerobic digestion of animal manure and chicken litter feedstock potential – Global and Irish perspective. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022.
- [39] L. Sun, P.B. Pope, V.G. Eijsink, A. Schnürer. Characterization of microbial community structure during continuous anaerobic digestion of straw and cow manure Microb Biotechnol, 2015.
- [40] Miguel Angel Barrena Gurbillón, Franklin Cubas Alarcón, Wildor Gosgot Angeles, Carla María Ordinola Ramírez, Jesús Rascón Barrios & Milton Huanes

Mariños, Sistema de producción de biogás y bioabonos a partir del estiércol de bovino, Molinopampa, Chachapoyas, Amazonas, Perú, versión impresa ISSN 1815-8242 versión On-line ISSN 2413-3299.

- [41] Aparicio, E., Rodríguez-Jasso, R. M., Lara, A., Loredó-Treviño, A., Aguilar, C. N., Kostas, E. T., & Ruiz, H. A. (2020). Biofuels production of third generation biorefinery from macroalgal biomass in the Mexican context: An overview. *Sustainable seaweed technologies*, 393-446.
- [42] K. Hagos, J. Zong, D. Li, C. Liu, X. Lu. Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges, and perspectives. *Renew Sustain Energy* 2016.
- [43] C. Rico, N. Muñoz, J. Fernández, J.L. Rico. High-load anaerobic co-digestion of cheese whey and liquid fraction of dairy manure in a one-stage UASB process: limits in co-substrates ratio and organic loading rate. *Chem Eng J*, 262 2015.
- [44] L. Chen, L. Zhao, C. Ren, F. Wang. The progress and prospects of rural biogas production in China. *Energy Policy*, 51 2012.
- [45] Hydrolysis kinetics in anaerobic degradation of particulate organic material: an overview. *Waste Manag.* 2008.
- [46] Chen, L., Neibling, H., 2014. *Anaerobic Digestion Basics*. University of Idaho, Extension, Moscow, pp. 1–6. <https://www.extension.uidaho.edu/publishing/pdf/CIS/CIS1215.pdf>. [60] C. Gerhardt, G. Suhlmann, F. Ziemssen, D. Donnan, M. Warschun, H.J. Kuhnle. How will cultured meat and meat alternatives disrupt the agricultural and food industry. *Ind. Biotechnol.* 2020.
- [47] S. Achinas, Y. Li, V. Achinas, G.J.W. Euverink. Influence of sheep manure addition on biogas potential and methanogenic communities during cow dung digestion under mesophilic conditions. *Sustain. Environ. Res.* 2018.

- [48] M. Abid, J. Wu, M. Seyedsalehi, Y.-Y. Hu, G. Tian. Novel insights of impacts of solid content on high solid anaerobic digestion of cow manure: kinetics and microbial community dynamics. *Bioresour. Technol* 2021.
- [49] A. Abbassi-Guendouz, D. Brockmann, E. Trably, C. Dumas, J.P. Delgenes, J.-P. Steyer, R. Escudie. Total solids content drives high solid anaerobic digestion via mass transfer limitation. *Bioresour. Technol*.
- [50] Thomas Schmidt, Peter Harris, Seonmi Lee, Bernadette K. McCabe, Investigating the impact of seasonal temperature variation on biogas production from covered anaerobic lagoons treating slaughterhouse wastewater using lab scale studies, *Journal of Environmental Chemical Engineering* Volume 7, Issue 3, June 2019, 103077.
- [51] B. Deepanraj, V. Sivasubramanian, S. Jayaraj, Kinetic study on the effect of temperature on biogas production using a lab scale batch reactor, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, Volume 121, November 2015, Pages 100-104.
- [52] Y. Li, J. Zhao, J. Krooneman, G.J.W. Euverink. Strategies to boost anaerobic digestion performance of cow manure: laboratory achievements and their full-scale application potential. *Total Environ.* 2021.
- [53] Jun Zhou, Rui Zhang, Fenwu Liu, Xiaoyu Yong, Xiayuan Wu, Tao Zheng Min Jiang, Honghua Jia, Biogas production and microbial community shift through neutral pH control during the anaerobic digestion of pig manure, *Bioresource Technology*, Volume 217, October 2016, Pages 44-49.
- [54] Lili Yang, Yue Huang, Mingxing Zhao, Zhenxing Huang, Hengfeng Miao, Zhiyang Xu, Wenquan Ruan, Enhancing biogas generation performance from food wastes by high-solids thermophilic anaerobic digestion: Effect of pH adjustment, *International Biodeterioration & Biodegradation*, Volume 105, November 2015, Pages 153-159.
- [55] C. Qi, R. Yin, X. Gao, J. Chen, R. Wang, Z. Xu, W. Luo, G. Li, Y. Li. Development of solid-state anaerobic digestion and aerobic composting hybrid processes for

organic solid waste treatment and resource recovery: a review. *Curr. Pollut.* 2022.

[56] Y. Xiao, H. Yang, D. Zheng, Y. Liu, C. Zhao, L. Deng. Granular activated carbon alleviates the combined stress of ammonia and adverse temperature conditions during dry anaerobic digestion of swine manure. *Renew. Energy.* 2021.

[57] G. Yang, P. Zhang, G. Zhang, Y. Wang, A. Yang. Degradation properties of protein and carbohydrate during sludge anaerobic digestion. *Bioresour. Technol.* 2015.

[58] S.A.F. Leite, B.S. Leite, D.J.O. Ferreira, B.E.L. Baêta, J.V.H. Dangelo, The effects of agitation in anaerobic biodigesters operating with substrates from swine manure and rice husk, *Chemical Engineering Journal*, Volume 451. January 2023, 138533.

[59] Varnero, M. (2011). Manual de biogás. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Ministerio de Energía (MINENERGIA), Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), Global Environment Facility (GEF). Santiago de Chile. 120 pp

[60] Khalil, M., Berawi, M. A., Heryanto, R., & Rizalie, A. (2019). Waste to energy technology: The potential of sustainable biogas production from animal waste in Indonesia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 105, 323-331.

[61] Guía-teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores, organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura, pág. 29.

[62] Fernando Sebastián Nogues, Daniel García Galindo, Adeline Rezeau, Energías renovables, Energía de la biomasa, Volumen II. Pág. 369.

[63] Yuanyuan Ren, Chen Wang, Ziang He, Yu Qin, Yu-YouLi, Biogas production performance and system stability monitoring in thermophilic anaerobic co-digestion of lipids and food waste, *Bioresour. Technol.*, Volume 358, August 2022, 127432.

- [64] Gaurav Nahar, Shailendrasingh Rajput, Oliver Grasham, Vishwanath Haily Dalvi, Valerie Dupont, Andrew B. Ross, Aniruddha B. Pandit, Technoeconomic analysis of biogas production using simple and effective mechanistic model calibrated with biomethanation potential experiments of water lettuce (*pistia stratiotes*) inoculated by buffalo dung, *Energy* Volume 244, Part B, 1 April 2022, 122911.
- [65] Derovil Antoniodos Santos Filho, Laís Roberta Galdino Oliveira, Tiago José Marques Fraga, Maurício Alvesda Motta Sobrinho, José Fernando Thomé Jucá, Development of a horizontal reactor with radial agitation to synthesize biomethane from biomass waste and domestic sewage sludge, *Journal of Cleaner Production*, Volume 257, 1 June 2020, 120616.
- [66] J.Martí-Herrero, G.Soria-Castellón, A.Díaz-de-Basurto, R.Alvarez, D.Chemisana, Biogas from a full scale digester operated in psychrophilic conditions and fed only with fruit and vegetable waste, *Renewable Energy*, Volume 133, April 2019, Pages 676-684.
- [67] Maria Luiza Veronezea, Daniel Schwantes, Affonso Celso Gonçalves Jr., Alfredo Richart, Jéssica Manfrin, Andréia da Paz Schiller, Thiago Bana Schuba, Production of biogas and biofertilizer using anaerobic reactors with swine manure and glycerin doses, *Journal of Cleaner Production*, Volume 213, 10 March 2019, Pages 176-184.
- [68] Rodríguez Godoy Francisca, Univ. Diego Portales [cl], B09B3/00, C02F11/04, C02F3/28, (+3), WO2022120505 (a1), 2022-06-16.
- [69] Eaton Alexander Bennet, A01C3/023, B65D88/16, C12M21/04, (+3), WO2019088818 (A1), 2019-05-09.
- [70] Mas Rodríguez Mario José, C02F11/04, C02F2101/30, C02F2103/20, (+16), WO2018146363 (A1), 2018-08-16.
- [71] Hansen Fernández Felipe, Labbé Silva José Ignacio, C02F3/2893, C05F11/00, C05F17/979, (+6), EP2799403 (A1), 2014-11-05, EP2799403 (A4), 2015-08-26.

- [72] Pesce Luciano, C12M21/04, C12M41/48, C12P5/023, (+1), WO2013126977 (A1), 2013-09-06, WO2013126977 (A8), 2013-12-05.
- [73] Garza Galicia Alejandro, C02F11/04, C02F2103/20, C12M21/04, (+5), WO2013089544 (A1), 2013-06-20.
- [74] Sarika Jain, 2019. World biogas association. Global potential of biogas 2019. Visitado el 3 de marzo de 2022. https://www.worldbiogasassociation.org/wp-content/uploads/2019/07/WBA-globalreport-56ppa4_digital.pdf.
- [75] Cepero, L., Savran, V., Blanco, D., Díaz Piñón, M. R., Suárez, J., & Palacios, A. (2012). Producción de biogás y bioabonos a partir de efluentes de biodigestores. *Pastos y Forrajes*, 35(2), 219-226.
- [76] Alfa, M. I., Adie, D. B., Igboro, S. B., Oranusi, U. S., Dahunsi, S. O., & Akali, D. M. (2014). Assessment of biofertilizer quality and health implications of anaerobic digestion effluent of cow dung and chicken droppings. *Renewable Energy*, 63, 681-686.

Capítulo III

Metodología para la caracterización fisicoquímica y la producción de biogás

3.1. Recolección y preparación de la muestra

Las muestras de estiércol fueron colectadas en los establos vacunos del Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma de Baja California, ubicado en el ejido Nuevo León del valle de Mexicali. Específicamente, las muestras se tomaron en las coordenadas geográficas, latitud 32.408212 y longitud -115.199968. En el caso de la vara de algodón, las muestras fueron recolectadas en una parcela del ejido Delta del valle de Mexicali, en las coordenadas geográficas, latitud 32.372513 y longitud -115.193342. En la Figura 11 y Figura 12 se presenta la ubicación geográfica donde fueron tomadas las muestras de vara de algodón y estiércol bovino, respectivamente.



Figura 11. Ubicación de geografía donde se recolectaron las muestras de vara de algodón.

A) Coordenadas y B) Parcela de vara de algodón.



Figura 12. Ubicación de geografía donde se recolectaron las muestras de estiércol bovino.
A) Coordenadas y B) Establo vacuno.

Las muestras de estiércol fueron almacenadas en bolsas herméticas y utilizadas el mismo día como materia fresca, como se muestra en la Figura 13. En el caso de la vara de algodón, las muestras fueron arrancadas del suelo con guantes de tela, después fueron lavadas con agua y secadas. El tamaño de las muestras se redujo manualmente a 2 cm de largo, y luego fueron molidas en una licuadora marca Osterizer, como se muestra en la Figura 14. Las muestras fueron almacenadas en bolsas herméticas para su uso posterior.



Figura 13. Muestra de estiércol bovino. A) Recolección de estiércol en establo y B) almacenamiento.

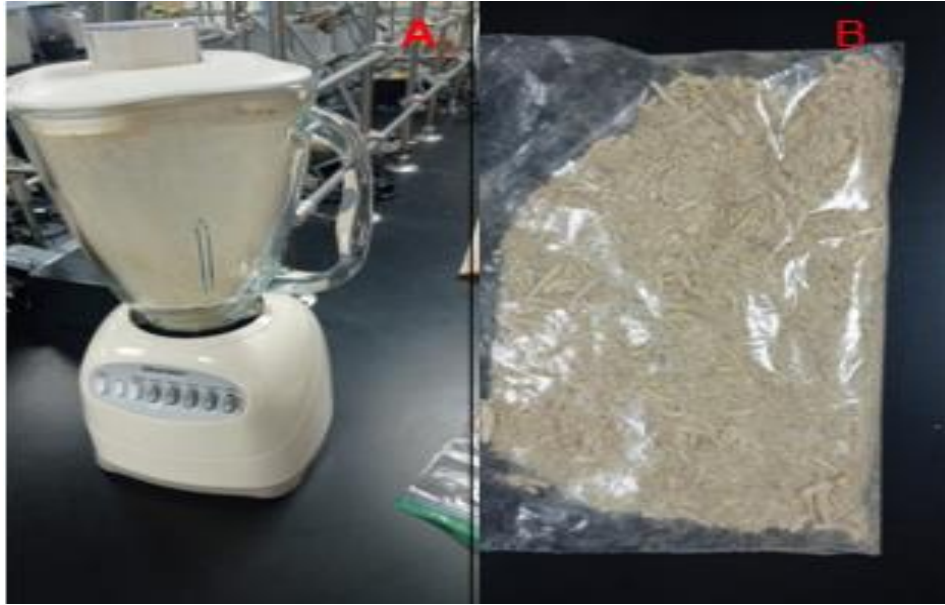


Figura 14. Muestra de vara de algodón. A) Licuadora Osterizer y B) vara de algodón molido.

3.2. Análisis próximo

Se utilizaron seis crisoles de porcelana, tres para la muestra de estiércol bovino y tres para la muestra de vara de algodón. Para preparar las muestras, se pesó 1 g de cada muestra y se agregó a los crisoles de porcelana correspondientes. Los análisis se realizaron por triplicado siguiendo la metodología establecida en la norma ASTM 870-82 [1].

3.2.1. Humedad

El análisis del porcentaje de humedad en muestras se realizó un crisol y una mufla. En este caso, las muestras se sometieron a una temperatura de 105°C por un período de 24 h hasta alcanzar un peso constante. El proceso descrito se llevó a cabo bajo condiciones estrictamente controladas de temperatura, tiempo, especificaciones de peso y equipos para garantizar la precisión y la reproducibilidad de los resultados.

El objetivo de este proceso fue determinar el porcentaje de humedad por la pérdida de masa de la muestra. La humedad en las muestras se determinó de acuerdo la Ecuación 3, establecida en la norma ASTM E871 [2].

$$\% H = \left[\frac{(X-Y)}{X} \right] * 100 \quad \text{Ecuación 3.}$$

Donde; %H = porcentaje de humedad.

X = masa de la muestra inicial (g).

Y = masa de la muestra seca después del calentamiento (g).

3.2.2. Materia volátil

Las muestras secas libres de humedad se sometieron a un calentamiento a 900°C durante 7 min en ausencia de aire para evitar la oxidación o combustión de la muestra. Después del calentamiento, se enfriaron los crisoles y se pesaron para determinar la pérdida de masa. Es importante asegurar que los resultados sean precisos y reproducibles siguiendo las pautas de la norma ASTM E872 [3], la pérdida de masa se calculó según la Ecuación 4.

$$\% M = \left[\frac{(X-Y)}{X} \right] * 100 \quad \text{Ecuación 4.}$$

%M = porcentaje de masa perdida.

X = masa de la muestra seca (g).

Y = masa de la muestra después del calentamiento (g).

Por último, se determina el porcentaje de materia volátil mediante la Ecuación 5.

$$\% MV = \% M - \% H \quad \text{Ecuación 5}$$

Dónde;

% MV = materia volátil

% M = porcentaje de masa perdida.

% H = porcentaje de humedad

3.2.3. Cenizas

El contenido de cenizas consiste en pesar una muestra de material y colocarla en un crisol. El crisol se colocó en una mufla y se quemó a 580°C durante 4 h. Después de este tiempo, el crisol se retiró del horno y se dejó enfriar durante unos minutos antes de pesarlo nuevamente. La diferencia de peso entre el crisol vacío y el crisol con las cenizas es la masa de las cenizas.

Es importante tener en cuenta que la determinación del contenido de cenizas puede verse afectada por factores como la temperatura y el tiempo de incineración, así como por la presencia de impurezas en la muestra. Por lo tanto, es necesario obtener resultados precisos y reproducibles siguiendo la norma ASTM E830 [4]. El porcentaje de cenizas se calculó con la Ecuación 6.

$$\% Ci = \left[\frac{Z}{X} \right] * 100 \text{ Ecuación 6.}$$

Dónde;

% Ci = porcentaje de cenizas.

Z = masa de las cenizas (g).

X = masa de muestra inicial (g).

3.2.4. Carbono fijo

El porcentaje de carbono fijo se obtiene restando el contenido de material volátil y el contenido de cenizas al peso inicial de la muestra, de acuerdo con la Ecuación 7. El carbono fijo representa de masa remanente después de un proceso de combustión o descomposición térmica.

$$\% FC = 100 - [\% MV + \% Ci] \text{ Ecuación 7}$$

Donde;

% FC = porcentaje de carbono fijo.

% MV = porcentaje de materia volátil.

% Ci = porcentaje de cenizas.

3.3. Análisis composición química

La biomasa vegetal contiene componentes lignocelulósicos como la celulosa, hemicelulosa y lignina, y componentes extraíbles que se refieren a los compuestos químicos que se pueden extraer de la biomasa utilizando disolventes como la acetona y el agua [5]. La celulosa y la hemicelulosa son polisacáridos que se encuentran en las paredes celulares de las plantas y son importantes componentes estructurales de la biomasa [6]. La lignina es un polímero natural que también se encuentra en las paredes celulares y es esencial para mantener la estructura de las plantas. La composición química de la biomasa se puede determinar a través de métodos de extracción química, separando cada componente de la biomasa [7].

3.3.1. Extracción en acetona

La extracción Soxhlet fue el método de extracción utilizado para extraer compuestos solubles de muestras sólidas con un disolvente. En este caso, se extrajeron compuestos de muestras de vara de algodón y de estiércol bovino utilizando acetona como disolvente. Se utilizaron seis cartuchos de celulosa secos, libres de extractos y previamente pesados en el equipo de extracción Soxhlet. En tres de los cartuchos se agregan 5 g de muestra de vara de algodón y en los otros tres se agregan 5 g de muestra de estiércol bovino. Estos cartuchos se colocaron en la parte inferior del equipo de extracción Soxhlet. En la parte superior de los cartuchos se colocaron círculos de papel filtro para evitar la pérdida de muestra durante el proceso de extracción. Se añadieron 200 mL de acetona al matraz de extracción del equipo Soxhlet y se inició el proceso de extracción. El disolvente se calentó para que entrara en ebullición rápida y se produjera la extracción de los compuestos solubles de la muestra. La extracción se realizó durante 8 horas para asegurar una extracción completa de los compuestos de interés de la muestra. Al finalizar la extracción, se retiró el equipo Soxhlet, se recuperó el disolvente que contiene los

compuestos extraídos en el matraz de extracción y los cartuchos se llevaron a la mufla 105°C durante 4 horas.

Finalmente, se pesaron nuevamente los cartuchos de celulosa con los compuestos extraídos para determinar la cantidad de compuestos extraídos de la muestra de vara de algodón y de estiércol. Este proceso de extracción Soxhlet con acetona permite obtener los compuestos solubles de la vara de algodón y el estiércol para su posterior análisis y determinación de su composición química

Se determinó el porcentaje de material extraíble en solvente orgánico con la Ecuación 8 de la norma TAPPI T264 [8].

$$\% E_{\text{Acetona}} = \left[\frac{(X - Y)}{X} \right] * 100 \text{ Ecuación 8}$$

Donde;

X = masa de la muestra seca, (g).

Y = masa después de la extracción de la muestra, (g)

3.3.2. Extracción en agua caliente

El proceso de extracción con agua caliente se llevó a cabo con un matraz Erlenmeyer de 500 mL al cual se le agregaron 4 g de muestra previamente extraída en cetona. Luego, se añadieron 200 mL de agua destilada caliente al matraz. El matraz se conectó a un condensador de reflujo y se colocó en un baño de agua hirviendo durante 4 horas. Durante este tiempo, se aseguró que el nivel de agua del baño se mantuviese por encima del nivel de la muestra en el matraz para garantizar una temperatura constante y uniforme. Después de las 4 horas de reflujo, filtró al vacío el contenido del matraz utilizando un embudo Büchner y papel filtro N° 5, esto permitió separar la muestra líquida de la muestra sólida. Posteriormente, se lavó la muestra sólida con 100 mL de agua caliente para asegurar una completa extracción de los compuestos solubles en agua. Luego, la muestra se dejó secar a 105°C

durante 4 h hasta alcanzar un peso constante para asegurar que toda la humedad se haya evaporado.

Este procedimiento se realizó seis veces, tres veces con muestras de vara de algodón y tres veces con muestras de estiércol bovino. El contenido de material extraíble en agua caliente se determinó utilizando la Ecuación 9, establecida en la metodología de la norma TAPPI T207 [9].

$$\% E_{\text{Agua caliente}} = \left[\frac{(X - Y)}{X} \right] * 100 \quad \text{Ecuación 9.}$$

Donde;

X = masa de la muestra seca, (g).

Y = masa después de la extracción de la muestra, (g).

3.3.3. Determinación de lignina

En un vaso precipitado de 50 mL se agregó 1 g de muestra seca libres de extraíbles en acetona y agua. Luego, se adicionó al vaso de precipitado 15 mL de H₂SO₄ al 72% y se agitó por un minuto a 400 rpm. Después, la mezcla se dejó reposar durante dos horas con agitación constante de 200 rpm. Pasado este tiempo, la mezcla se transfirió a un Erlenmeyer de 1 L y la concentración del ácido se diluyó al 3% adicionando 560 mL de agua destilada. Seguido a esto, el matraz se calentó a ebullición durante 4 h utilizando un condensador de reflujo como se muestra en la Figura 15.

Después, la mezcla se dejó enfriar y se filtró al vacío utilizando un embudo Büchner y papel filtro Whatman N° 5. El precipitado se lavó con 100 mL de agua caliente y se secó a 105 °C durante 4 horas. Este procedimiento se realizó seis veces, tres veces con muestras de vara de algodón y tres veces con muestras de estiércol bovino. El contenido de lignina se determinó utilizando la Ecuación 10, establecida en la metodología de la norma ASTM D1106 [10].

$$\% \text{ Lignina} = \left[\frac{X}{Y} \right] * 100 \quad \text{Ecuación 10.}$$

Donde;

X = masa del residuo secado al horno (g).

Y = masa de la muestra seca libre de extractos. (g)



Figura 15. Determinación de lignina.

3.3.4. Determinación de holocelulosa

Para llevar a cabo este procedimiento se realizó el montaje que se muestra en la Figura 15. En un matraz de 250 mL se agregó 2 g de muestra seca libres de extraíbles de acetona y agua. En el matraz se adicionó 150 mL de agua destilada, 0.2 mL de ácido acético y 1 g de clorito de sodio. Luego, se calentó el matraz en un baño de agua a 75 °C por 5 h. Después, se adicionó 0.22 mL de ácido acético y 1 g de clorito de sodio cada hora manteniendo agitación constante. Al pasar las 5 h, el matraz se enfrió en un baño de agua fría. La mezcla resultante se filtró al vacío utilizando un embudo Büchner y papel filtro Whatman N° 5. El residuo se lavó con 100 mL de agua fría y se secó en el horno a 105°C durante 4 h. El cambio de color del residuo de amarillo a blanco indicó la extracción efectiva de holocelulosa.

El contenido de holocelulosa se determinó utilizando la Ecuación 11, establecida en la metodología de la norma ASTM D1104 [11].

$$\% \text{ Holocelulosa} = \left[\frac{X}{Y} \right] * 100 \quad \text{Ecuación 11.}$$

Donde;

X = masa del residuo secado al horno (g).

Y = masa de la muestra seca libre de extractos. (g)

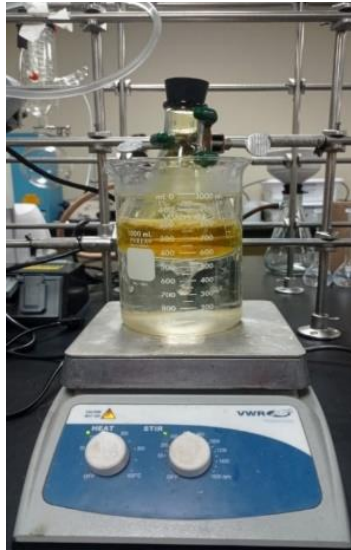


Figura 16. Determinación de holocelulosa.

3.3.5. Determinación de celulosa

En un matraz Erlenmeyer de 250 mL se agregó 1 g de muestra de holocelulosa previamente secada. Luego, se colocó el matraz en un baño de agua a una temperatura de 20 °C. Después, se adicionó al matraz 50 mL de NaOH al 17.5% y se mezcló durante 1 min. La mezcla se dejó reaccionando durante 29 min. Pasado este tiempo, se adicionaron 50 mL de agua destilada a la mezcla y se agitó durante 1 min, dejando reposar durante 5 min adicionales.

Luego, el contenido del matraz se filtró al vacío utilizando un embudo Büchner y papel filtro Whatman N° 5. El residuo insoluble se lavó cuatro veces: primero con 50 mL de una solución de NaOH al 8.3%, segundo con 60 mL de agua, tercero con 40 mL de ácido acético al 10% y cuarto con 200 mL de agua caliente. Después de los lavados, el papel filtro junto con el residuo insoluble se secó en el horno a 105 °C

durante 4 horas. Por último, se retiró el papel filtro del horno y se llevó a un desecador para enfriar a temperatura ambiente. Luego, se pesó el papel filtro junto con el residuo para determinar la cantidad de celulosa presente en la muestra.

Este procedimiento se realizó seis veces, tres veces con muestras de estiércol bovino y tres veces con muestras de vara de algodón. El contenido de celulosa se determinó utilizando la Ecuación 12, establecida en la metodología de la norma ASTM D1103 [12].

$$\% \text{ Celulosa} = \left[\frac{X}{Y} \right] * 100 \quad \text{Ecuación 12.}$$

Donde;

X = masa del residuo secado al horno (g).

Y = masa de holocelulosa secada al horno (g)

3.3.6. Determinación de hemicelulosa

El porcentaje de hemicelulosa en la muestra fue por diferencia, es decir, se restó el porcentaje de celulosa al porcentaje de holocelulosa, Ecuación 13.

$$\% \text{ Hemicelulosa} = \% \text{ Holocelulosa} - \% \text{ Celulosa} \quad \text{Ecuación 13}$$

3.4. Carbono orgánico

3.4.1. Preparación de la curva de calibración

El procedimiento utilizado para determinar el porcentaje de carbono orgánico en las muestras de estiércol bovino y vara de algodón fue el método de Walkley-Black mediante la técnica colorimétrica. Primero, se preparó una solución estándar de sacarosa de concentración 5.16 g/L. A partir de esta solución se preparó la curva de calibración tomando ocho alícuotas (0, 0.5, 1, 2, 3, 4, 5 y 6 mL), las cuales se transfirieron a matraces de 50 mL. Luego, se adicionaron 5 mL de $K_2Cr_2O_7$ a una concentración de 1 N y se homogenizó la mezcla con agitación lenta. Enseguida, se adicionaron 10 mL de H_2SO_4 a una concentración de 96 % y se homogenizó con

agitación lenta, dejando reposar por 30 min. Pasado este tiempo, se aforaron los matraces de 50 mL y dejaron reposar durante 24 horas.

Finalmente, se tomaron las lecturas de absorbancias de la curva de calibración en el espectrofotómetro visible iris HANNA a una longitud de onda de 590 nm, como se muestra en la Figura 17.

3.4.2. Preparación de las muestras



Figura 17. Espectrofotómetro visible iris

En un matraz volumétrico de 50 mL se agregaron 1 g de muestra. Luego, se adicionaron 5 mL de $K_2Cr_2O_7$ a una concentración de 1 N. Enseguida, se adicionaron 10 mL de H_2SO_4 al 96 % y se dejó reaccionar durante 30 min. Después, el matraz se aforó a 50 mL con agua destilada y se dejó reposar durante 24 horas. Transcurrido este periodo, la muestra se filtró utilizando un papel Whatman 5. El filtrado se agregó a la celda y se realizó la lectura de absorbancia a una longitud de onda de 590 nm.

La concentración de carbono orgánico se calculó usando la Ecuación 14, establecida por el método Walkley-Black [13].

$$[C.O] \text{ (g/kg)} = [L_{\text{absorbancia}} - I_{\text{curva calibración}}] / [P_{\text{curva}} * M_{\text{muestra}}] \quad \text{Ecuación 13.}$$

Donde;

L_{absorbancia}: Lectura

$I_{\text{curva calibración}}$: Intercepto

P_{curva} : Pendiente

M_{muestra} : Masa

Para obtener la curva de calibración se graficó la absorbancia contra los miligramos de carbono (mg C) de cada estándar. Los datos proporcionados por la curva se expresan en unidades de mg C /g de muestra, la cual a su vez es igual a g C/kg de muestra.

3.5. Determinación de demanda química de oxígeno

3.5.1. Preparación de la curva de calibración

La curva utilizada corresponde a la curva de un estándar con biftalato de potasio en concentraciones de 0 a 1,500mg/L.

3.5.2. Preparación de soluciones

Solución digestora: en un matraz de un litro, se disuelve 42.25 g de dicromato de potasio con 500 mL de agua destilada, luego se añade 33.3 g de sulfato mercúrico, seguido a esto se lleva a un baño de hielo y lentamente se adiciona 157 mL de ácido sulfúrico puro. Al enfriarse la mezcla, se disuelve y se afora.

Solución de ácido sulfúrico puro con sulfato de plata: se pesa 5.5 g de sulfato por kg de ácido sulfúrico utilizado (se debe tener en cuenta la densidad y pureza), en un matraz de un litro se adicionan 300 mL del ácido con la cantidad requerida de sulfato de plata. Luego se deja en reposo uno o dos días hasta que se disuelva y después se acido restante.

3.5.3. Preparación del reactivo digestor

En tubos con tapa de rosca, se añade 1 mL de la solución digestora. Luego añadir 2 mL de solución con ácido con plata. Se tapa y se homogeniza la mezcla mediante agitación suave. Se guardan estos tubos en la oscuridad.

3.5.4. Preparación de las muestras a analizar

En los tubos con el reactivo digestor, se adicionaron lentamente 2 mL de la muestra a analizar o 2 mL de agua destilada para el blanco. Se tapó y homogenizó con agitación lenta. Luego se colocaron los tubos durante 2 h de la parrilla de digestión a 150 °C, se retiraron de la parrilla y dejaron enfriar. Por último, se tomaron las lecturas de las muestras en un espectrofotómetro marca Hach DR6000 a una longitud de onda 620 nm, de acuerdo con la metodología establecida en la norma EPA 410.4 [14].

3.6. Determinación de sólidos totales, sólidos volátiles totales y sólidos fijos totales

3.6.1. Sólidos totales

Se siguió el siguiente procedimiento para determinar los sólidos totales (ST) en una muestra:

Se tomó una alícuota de 25 mL de volumen de la muestra del inculo. Luego, se transfirió la muestra a una cápsula de porcelana previamente pesada y registrada como masa inicial. Después, se colocó la cápsula con la muestra en una estufa y se secó a 105°C. Una vez que la muestra se ha secado completamente, se retiró la cápsula de la estufa y dejó enfriar a temperatura ambiente. Siguiendo a esto, se colocó la cápsula con la muestra seca en un desecador para que se equilibre con la humedad ambiente y alcanzara peso constante. Por último, se pesó la masa final de la cápsula con la muestra seca.

La norma de ensayo estándar utilizada para determinar los sólidos totales en muestras fue Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2015 [15], Ecuación 14.

$$ST = \left[\frac{(X_1 - X_2)}{V} \right] * 1,000,000 \text{ Ecuación 14.}$$

Donde;

ST= son los sólidos totales, en mg/L.

X_1 = masa de la cápsula con la muestra seca (g).

X_2 = masa de la capsula vacía (g).

V= volumen de la muestra, en mL.

3.6.2. Sólidos volátiles totales

Se siguió el siguiente procedimiento para determinar los sólidos volátiles totales:

Se introdujo la cápsula que contenía la muestra seca en la mufla a una temperatura de $550^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$ durante 15 minutos. Este paso tuvo como objetivo eliminar cualquier residuo de materia orgánica y obtener los sólidos inorgánicos. Luego, se transfirió la cápsula de la mufla a un desecador para dejar enfriar durante 20 min. Después, se determinó el peso de la cápsula con el residuo hasta alcanzar peso constante. La norma de ensayo estándar utilizada para determinar los sólidos totales en muestras fue Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2015 [15], Ecuación 15.

$$\text{SVT} = \left[\frac{(X_1 - X_3)}{V} \right] * 1,000,000 \text{ Ecuación 15.}$$

Donde;

SVT: sólidos volátiles totales, en mg/L.

X_1 = masa de la cápsula con la muestra seca (g).

X_3 = masa de la capsula con el residuo, después del calentamiento (g).

V= volumen de la muestra, en mL.

3.6.3. Sólidos fijos totales

El método utilizado para determinar los sólidos fijos totales en la muestra fue por diferencia, es decir, se restó los sólidos volátiles totales a los sólidos totales, Ecuación 16.

$$\text{SFT} = \text{ST} - \text{SVT} \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde,

SFT= sólidos fijos totales.

3.7. Conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos y pH.

Se utilizaron dos tipos de muestras: estiércol y vara de algodón.

Para cada muestra, se pesó 1 g y se agregaron a vasos precipitados diferentes. A la muestra de estiércol se le adicionaron 60 mL de agua, mientras que a la muestra de vara de algodón se le adicionaron 40 mL de agua. Luego, ambas mezclas se agitaron y se filtraron, para separar los componentes sólidos de la muestra líquida. Esto fue necesario para evitar interferencias en el análisis y facilitar la manipulación de la muestra líquida resultante. Los electrodos del medidor fueron introducidos a cada mezcla para obtener los valores de cada parámetro.

El medidor utilizado cuenta con una pantalla LCD que proporcionó lecturas instantáneas de pH, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos y temperatura. El medidor que se utilizó para determinar estos parámetros fue el Hanna Instruments 716800 Grochek Combo PH/EC/TDS/Temp Monitor (HI 991404) mostrado en la Figura 18.



Figura 18. Medidor de pH Hanna Instruments 716800 Grochek

Tabla 10. Resumen de normas y metodologías usadas

Análisis	Determinaciones	Norma/Método	Referencia
Análisis Próximo	Humedad	ASTM E871-82 (2006)	[2]
	Material Volátil	ASTM E872-82(2006)	[3]
	Ceniza	ASTM E830-87(2004)	[4]
	Carbono Fijo	Por diferencia	
Composición Química	Extraíbles en solvente orgánico	TAPPI T264	[8]
	Extraíbles en agua caliente	TAPPI 207	[9]
	Lignina	ASTM D1106-96(2007)	[10]
	Holocelulosa	ASTM D 1104	[11]
	Celulosa	ASTM D1103-60(1977)	[12]
	Hemicelulosa	Por diferencia	
Carbono	Carbono orgánico	MÉTODO DE WALKLEY-BLACK	[13]
Demanda química de oxígeno	DQO	EPA 410.4	[14]
Análisis de sólidos	Sólidos totales		
	Sólidos volátiles	NMX-AA-034-SCFI-2015	[15]
	Sólidos fijos		
Análisis de pH	pH		
	Conductividad eléctrica	POTENCIOMETRÍA	--
	Sólidos disueltos totales		

3.8. Determinación de biogás y medición indirecta de biometano

La cantidad de biogás generado en la digestión anaerobia se puede determinar mediante el desplazamiento volumétrico de agua en una columna vertical. El volumen de agua desplazada por el gas corresponde al volumen de biogás generado [16]. El principal componente energético del biogás es el metano, cuya concentración se puede medir utilizando técnicas instrumentales como la cromatografía de gases [17]. Sin embargo, se han reportado metodologías alternativas para medir de forma indirecta la concentración de metano en muestras de biogás con porcentajes de error relativamente bajos. Una metodología frecuentemente empleada, consiste en pasar el biogás por una solución básica o alcalina para solubilizar la gran parte de los gases presentes en el biogás con excepción del metano que no se solubiliza en la solución alcalina utilizada. El gas obtenido después de este procedimiento se llama comúnmente biometano [18]. Este procedimiento se describe de manera más detallada en la sección 3.8.3.

3.9. Descripción del diseño experimental

3.9.1. Objetivo del experimento

El objetivo del diseño experimental fue evaluar el efecto de la composición del sustrato sobre la producción de biometano. Se evaluó el efecto de tres factores: agua, estiércol y vara de algodón, mediante un diseño factorial mixto $2^2 \times 3$. Donde, dos factores agua y vara de algodón se trabajaron a dos niveles, mientras que el factor estiércol se trabajó a tres niveles, manteniendo una temperatura de 35 °C.

En la Tabla 11 se presentan las proporciones en masa en las que se mezclan los factores estudiados. Los niveles en los que se trabajó el factor agua se seleccionaron de acuerdo con investigaciones previas que recomiendan utilizar entre 3 y 5 kg de agua por cada kg de estiércol, para garantizar la movilidad de los microorganismos en la mezcla [19, 20]. Las proporciones en las que se trabajó la vara de algodón son menores comparadas con los demás factores. Se estudia el efecto de la vara de algodón sobre la generación de biogás, teniendo en cuenta que la vara de algodón puede incrementar el área superficial al interior del biodigestor y

facilitar la interacción entre las bacterias y la materia orgánica [21]. Por otra parte, la vara de algodón es un material lignocelulósico que presenta una degradación lenta frente a los microorganismos anaeróbicos y su aporte a la generación de biogás puede ser limitado [22]. Todos los experimentos se realizaron por triplicado de manera aleatoria para garantizar una mayor confiabilidad de los datos.

Tabla 11. Proporciones másicas en la que se mezclan los factores utilizados en el diseño experimental

Tratamiento	*Agua (A)	*Estiércol (E)	*Vara (V)	A	E	V
T1	5	1	0.1	+1	+1	+1
T2	5	0.9	0	+1	0	-1
T3	3	0.9	0	-1	0	-1
T4	3	0.9	0.1	-1	0	+1
T5	3	1	0.1	-1	+1	+1
T6	3	1	0	-1	+1	-1
T7	5	1	0	+1	+1	-1
T8	5	0.9	0.1	+1	0	+1
T9	3	0	0.1	-1	-1	+1
T10	3	0	0	-1	-1	-1
T11	5	0	0.1	+1	-1	+1
T12	5	0	0	+1	-1	-1

* proporciones masa: masa

La temperatura es un factor de vital importancia en la producción de biogás, ya que regula directamente la actividad de los microorganismos anaeróbicos responsables de la digestión anaeróbica. La elección de mantener una temperatura constante de 35°C se basa en la observación de que esta temperatura se encuentra dentro del rango óptimo de actividad para numerosas bacterias metanogénicas [23].

3.9.2. Variable de respuesta

En este experimento se seleccionó el biometano como la variable de respuesta, debido a que es el principal componente energético del biogás. La cantidad de biometano se midió mediante el desplazamiento volumétrico de agua en una serie de columnas verticales como se muestran en las Figuras 19 y 20. El sistema de medición de la variable de respuesta inicia con el flujo de biogás generado en el biodigestor y conducido hacia el contenedor 1. En este contenedor se tiene una solución de NaOH a una concentración de 1N, la cual es utilizada para solubilizar los gases presentes en el biogás que no agregan valor desde el punto de vista energético, como el CO₂ [24]. La fracción de gas que no se solubiliza corresponde al biometano que pasa desde el contenedor 1 hacia el contenedor 2 a través de un ByPass. La acumulación de biometano incrementa la presión del contenedor forzando el desplazamiento del agua desde el contenedor 2 hacia el contenedor 3. El volumen de agua almacenada en el contenedor 3 corresponde al volumen del biometano almacenado en el contenedor 2.

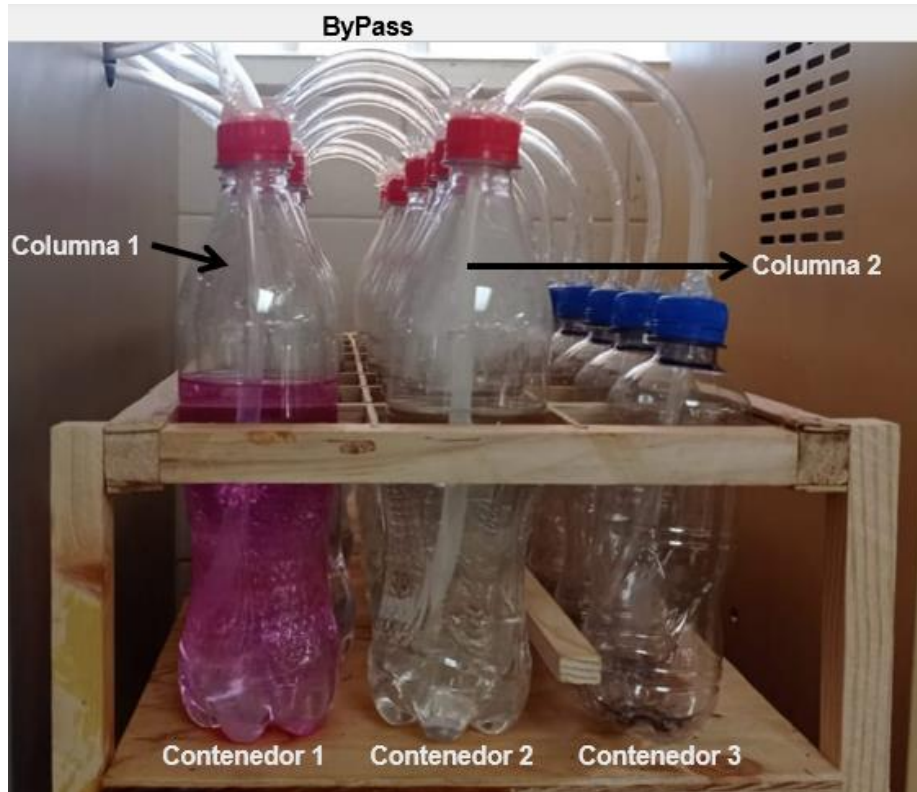


Figura 19. Sistema de desplazamiento volumétrico de agua para el biometano.



Figura 20. Vista superior del sistema de desplazamiento de agua.

Es importante resaltar que el contenedor 3 se encontraba abierto a la presión atmosférica, por lo tanto, fue posible medir el volumen de agua en este contenedor sin afectar el sistema de captura de gases. En la figura 21 se ilustra un esquema sobre la medición del volumen de biometano.

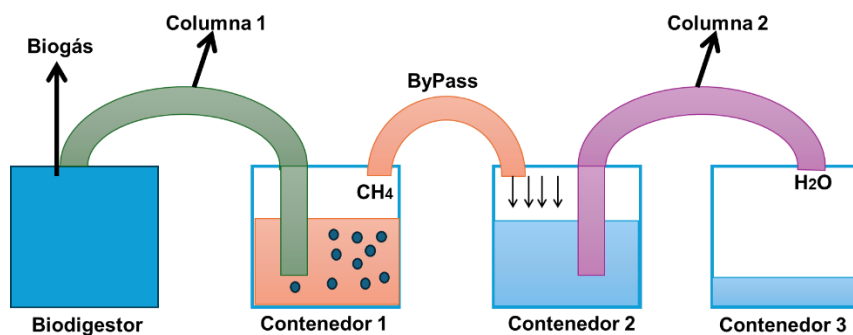


Figura 21. Esquema completo del desplazamiento de agua.

El registro del volumen de agua en el contenedor 3 se midió semanalmente durante un tiempo de retención de 35 días, utilizando una probeta de 50 mL (± 0.02 mL). En

este experimento se fijó un tiempo de retención de 35 días debido a que corresponde al tiempo reportado en la literatura [25].

3.9.3. Descripción del proceso de digestión anaerobia

La digestión anaerobia se llevó a cabo en biodigestores tipo batch con una capacidad de 2 L. Los biodigestores utilizados se construyeron a partir de recipientes plásticos, los cuales fueron adaptados a las necesidades del proceso experimental como se muestra en el esquema de la Figura 22.

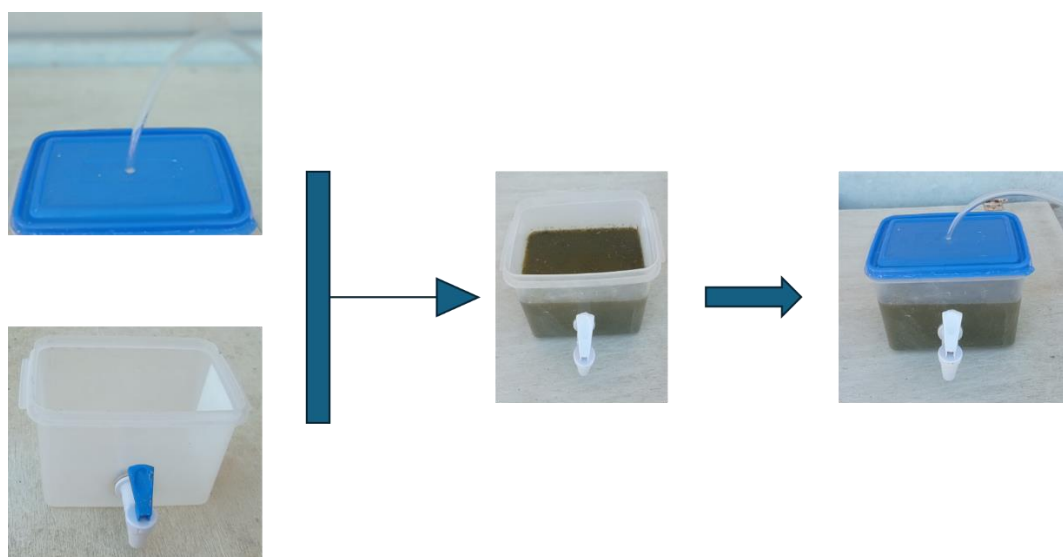


Figura 22. Construcción de los biodigestores tipo batch.

A cada biodigestor se le agregó: agua, estiércol y vara de algodón, de acuerdo con el diseño experimental. La mezcla se homogenizó mediante agitación manual hasta desaparecer los grumos. Luego, los biodigestores se taparon y se sellaron herméticamente. Después, se colocaron conexiones de tuberías de plástico en la parte superior de los biodigestores, para capturar el biogás producido. Seguidamente, se revisaron fugas en el sistema utilizando gas nitrógeno presurizado y los biodigestores fueron introducidos dentro de incubadoras de la marca Shel lab modelo 1545. Las incubadoras se mantuvieron a una temperatura de 35 °C durante el tiempo de retención hidráulica de 35 días. La distribución de los biodigestores al interior de las incubadoras se presenta en la Figura 23.



Figura 23. Distribución de biodigestores al interior de la incubadora

El biogás generado en los biodigestores fue conducido por tuberías flexibles desde el interior de la incubadora derecha hasta el sistema de captura de gases ubicado fuera de la incubadora. Las conexiones flexibles atraviesan la pared de la incubadora a través de un orificio ubicado en la parte lateral derecha, como se muestra en la Figura 24.



Figura 24. Salida de tuberías que comunican los biodigestores con el sistema de medición de biogás y biometano

Finalizado el tiempo de retención hidráulica, se midió el volumen total desplazado y recolectado en el tercer depósito. Los resultados se analizaron estadísticamente

aplicando el análisis de varianza (ANOVA) utilizando el paquete estadístico Minitab 18. A partir de los resultados encontrados se seleccionó la mejor condición para la producción de biometano, la cual se utilizó posteriormente en el biodigestor de 20 L construido.

3.10. Diseño del biodigestor

3.10.1. Selección de la ubicación

La ubicación seleccionada para operar el biodigestor fue el Instituto de Ciencias Agrícolas (ICA) debido a la cercanía y accesibilidad de los residuos utilizados en la investigación. Además, las instalaciones del ICA facilitaban el manejo de residuos para minimizar posibles olores que pudieran derivar de la operación del biodigestor.

3.10.2. Establecimiento de Parámetros de Diseño y Componentes Necesarios

El proceso que se aplica en la actualidad para la producción de biogás son los biodigestores herméticos. En la Tabla 12 se muestran los componentes y materiales utilizados para la construcción de biodigestor.

Tabla 12. Componentes y materiales para la construcción del biodigestor.

Componentes necesarios	Materiales
Biodigestor de 20L	Laminas acrílicas
Entrada para alimentación de residuos	Pegantes transparentes
Salida para el fertilizante	Tuberías y accesorios de PVC
Salida de purga	Mangueras plásticas
Sistema de almacenamiento de biogás	Válvulas de PVC
	Válvulas de metal
Sistema de control de presión	Silicona líquida
Sistema de eliminación de H ₂ S	Aluminio
Sistema de enchaquetado	Bolsas recolectoras de biogás
Sistema de eliminación de agua	Pinzas, taladros y hojas de sierra.
Toma de muestra de biogás	Clavos, brocas y discos para cortes.

3.10.3. Descripción del Biodigestor

El biodigestor se realizó en material acrílico transparente, en forma rectangular. Este biodigestor conto con un enchaquetado en material acrílico para controlar la temperatura. Se agregaron tuberías, válvulas y aditamentos para la alimentación, salida y purga de sustrato o efluentes. Se instaló un sistema para la recolección de biogás y toma de muestras del sustrato al interior de biodigestor.

3.10.4. Construcción del Biodigestor

En la Figura 25 se establece la secuencia de operaciones realizadas para la construcción del biodigestor de 20L. En la figura 26 se muestran los aditamentos para el sistema de calentamiento para el sistema de calentamiento.

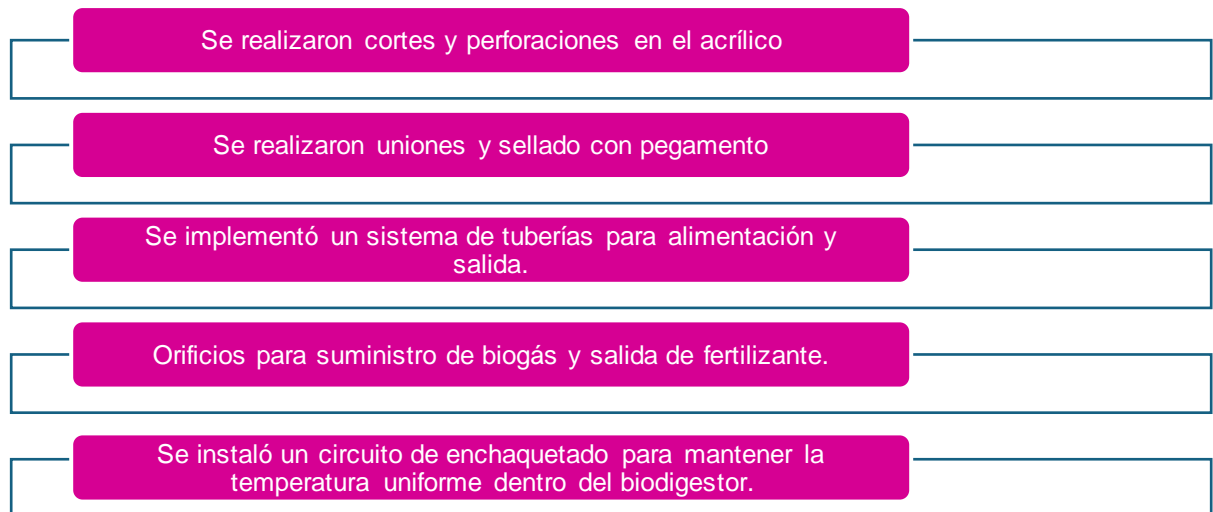


Figura 25. Secuencia de operaciones para la construcción del biodigestor de 20 L.



Figura 26. Aditamentos para el sistema de calentamiento del biodigestor de 20 L.

3.10.5. Instalación Experimental

En la Figura 27 se establece la secuencia de operaciones realizadas para la instalación del biodigestor de 20 L.

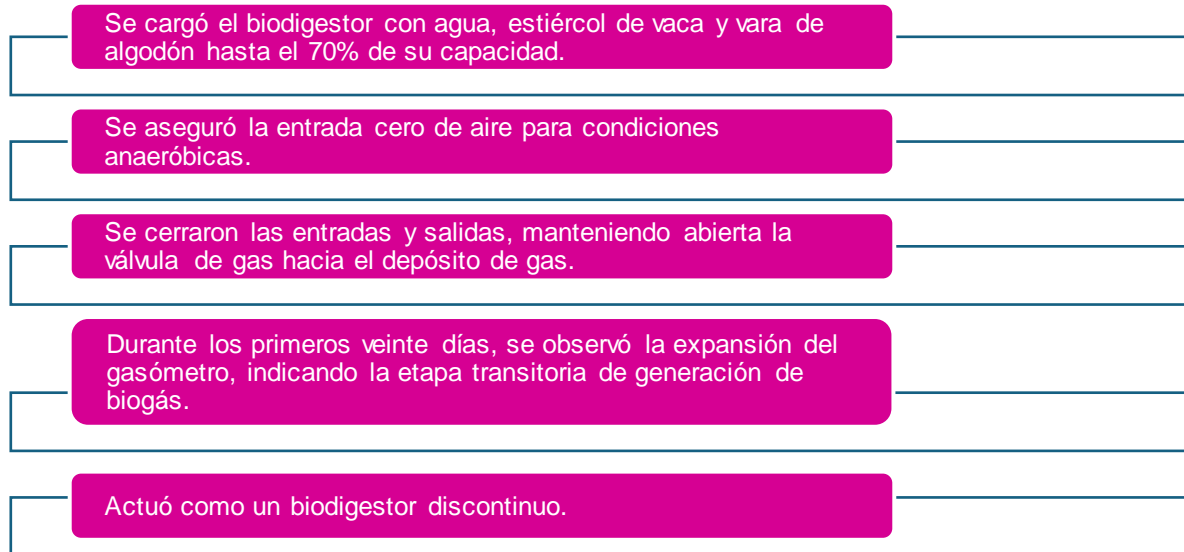


Figura 27. Secuencia de operaciones para la instalación del biodigestor de 20 L.

De acuerdo con los procesamientos descritos de la construcción y puesta en marcha del biodigestor, en la Figura 28 se ilustran imágenes del diseño y construcción de biodigestor.

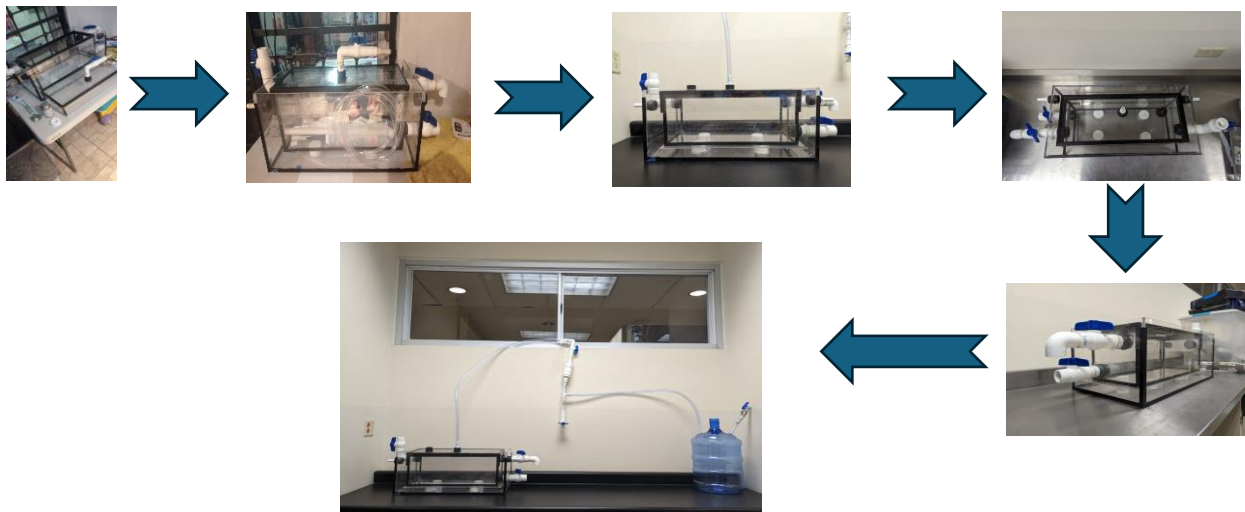


Figura 28. Diseño y construcción del biodigestor de 20 L.

Referencias

- [1] Standard Practice for Testing Water Resistance of Coatings Using Water Immersion," ASTM International, West Conshohocken, USA: ASTM International.
- [2] ASTM E871-82. (2006). Standard test method for moisture analysis of particulate wood fuels. West Conshohocken, USA: ASTM International.
- [3] ASTM E872-82. (2006). Standard test method for volatile matter in the analysis of particulate wood fuels. West Conshohocken, USA: ASTM International.
- [4] ASTM E830-87. (2004). Standard test method for ash in the analysis sample of refuse derived fuel. West Conshohocken, USA: ASTM International.
- [5] ZJ Li , DF Guo , YY Liu , HY Wang , LL Wang. Avances y desafíos recientes en nanomateriales de carbono porosos derivados de biomasa para supercondensadores. Química. Ing. J. 397 (2020)
- [6] J. Li , JJ Dai , GQ Liu , HD Zhang , ZP Gao , J. Fu , et al. Biocarbón procedente de pirólisis de biomasa por microondas: una revisión. Biomasa Bioenergía , 94 (2016) , págs . 228-244.
- [7] Bojun Zhao, Haoyu Wang, Sida Xu, Lixin Qian, Haoyang Li, Jihui Gao, Guangbo Zhao, Madhumita. Ray, Chunbao Charles Xu. Influence of extraction solvents on the recovery yields and properties of bio-oils from woody biomass liquefaction in sub-critical water, ethanol or water–ethanol mixed solvent. January 2022.
- [8] TAPPI T264 cm-07. (2007). Preparation of wood for chemical analysis.
- [9] TAPPI T207 cm – 99. (1999). Water solubility of wood and pulp.
- [10] ASTM D1106-96. (2007). Standard test method for acid-insoluble lignin in wood. West Conshohocken, USA: ASTM International. 86.
- [11] ASTM D1104-56. (1978). Method of Test for Holocellulose in Wood (Withdrawn 1985). USA: ASTM International.

- [12] ASTM D1103-60. (1977). Method of test for alpha-cellulose in wood (withdrawn 1985). West Conshohocken, USA: ASTM International.
- [13] An Examination of Degtjareff Method for Determining Soil Organic Matter, and a Proposed Modification of the Chromic Acid Titration Method." *Soil Science* 37(1): 29-38.
- [14] EPA Method 410.4: "Chemical Oxygen Demand (COD), Titrimetric, Method 410.4," U.S. Environmental Protection Agency, 1978.
- [15] Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2015, Protección al ambiente - Agua - Medición de sólidos y sales disueltas. 2015.
- [16] R.O. Cadena Pereda, E.M. Rivera Muñoz, G. Herrera Ruiz. Automatic volumetric gas flow meter for monitoring biogas production from laboratory-scale anaerobic digester. May 2010
- [17] F. Hilaire, E. Basset, R. Bayard, M. Gallardo, D. Thiebaut, J. Vial. Comprehensive two-dimensional gas chromatography for biogas and biomethane analysis. *Journal of Chromatography*. 2017.
- [18] SILVIA DORALID ROJAS ARQUIÑIGO. Estudio de parámetros cinéticos relacionados a la purificación del biogás con hidróxido de sodio. Universidad nacional agraria La Molina. Facultad de Ciencias. 2022.
- [19] A.F. Aili Hamzah, M.H. Hamzah, N.I. Mazlan, H. Che Man, N.S. Jamali, S.I. Siajam, P.L. Show. Optimization of subcritical water pre-treatment for biogas enhancement on co-digestion of pineapple waste and cow dung using the response surface methodology. *Waste Management*. 2022.
- [20] Miguel Angel Barrena Gurbillón, Franklin Cubas Alarcón, Wildor Gosgot Angeles, Carla María Ordinola Ramírez, Jesús Rascón Barrios & Milton Huanes Mariños. System for the production of biogas and biofertilizers from bovine manure, Molinopampa, Chachapoyas, Amazonas, Perú. *Arnaldoa*. 2019.
- [21] Zhenghui Gao, Khaled Alshehri, Yuan Li, Hang Qian, Devin Sapsford, Peter Cleall, Michael Harbottle. *Advances in biological techniques for sustainable*

lignocellulosic waste utilization in biogas production. Renewable and Sustainable. Energy Reviews. 2022.

- [22] Triolo, Sven G Sommer, Henrik B Moller, Martin R Weisbjerg, Xinyuan Jiang. Influence of lignin on biochemical methane potential of biomass for biogas production. Current Opinion in Biotechnology. 2011.
- [23] Vicky Kumar, Shamsul Rahman B.M. Kutty, Lavania Baloo, Aiban Abdulhakim Saeed Ghaleb, Azmatullah Noor. Effective treatment of oily sludge for biogas and methane gas production at mesophilic using anaerobic batch reactor (AnBR). Materials Today: Proceedings. 2022.
- [24] Nicolás Vaquerano-Pineda, Teresa Salazar-Rojas, María Porrás Acosta. Medicion Automatica Del Metano En Biogas Por Columnas de desplazamiento. Teconologia en marcha. 2016.
- [25] Mahbub Alam, Maisha Binte Sultan, Maheen Mehnaz, Chowdhury Sharif Uddin Fahim, Shabiha Hossain, Amit Hasan Anik. Production of biogas from food waste in laboratory scale dry anaerobic digester under mesophilic condition. Energy Nexus. 2022.

Capítulo IV

Análisis y discusión de resultados

4.1. Análisis próximo

Los resultados indican que el estiércol bovino y la vara de algodón tienen diferentes contenidos de humedad, materia volátil, cenizas y carbono fijo. El estiércol bovino presentó en promedio 68.77 % de humedad, 3.44 % de materia volátil, 21.52 % de cenizas y 75.03 % de carbono fijo, como muestra la Tabla 13. Por otra parte, se obtuvieron los resultados de la vara de algodón, esta presentó en promedio 6.17 % de humedad, 69.62 % de materia volátil, 5.21 % de cenizas y 25.16 % de carbono fijo, resultados mostrados en la Tabla 14.

Tabla 13. Análisis próximo del estiércol bovino

Análisis en base seca				
Muestra	Humedad (%)	Materia volátil (%)	Cenizas (%)	Carbono fijo (%)
1	68.9841	3.5612	21.4619	74.9769
2	68.7039	3.3421	21.4166	75.2413
3	68.6308	3.4253	21.6909	74.8838
Promedio	68.7729	3.4429	21.5231	75.0340
DS*	0.1865	0.1106	0.1470	0.1820

*DS: Desviación estándar.

Tabla 14. Análisis próximo de la vara de algodón

Análisis en base seca				
Muestra	Humedad (%)	Materia volátil (%)	Cenizas (%)	Carbono fijo (%)
1	6.0721	69.5518	5.2711	25.1771
2	6.2344	69.7541	5.2612	24.9847
3	6.2308	69.5620	5.1199	25.3181
Promedio	6.1791	69.6226	5.2174	25.1600
DS*	0.0927	0.1140	0.0846	0.1674

*DS: Desviación estándar.

El estiércol bovino tiene un contenido de humedad significativamente mayor que la vara de algodón. También hay una diferencia en la cantidad de materia volátil, cenizas y carbono fijo entre los dos residuos. En el caso del estiércol bovino, la

humedad representa más de la mitad del peso del material, mientras que la vara de algodón tiene un contenido de humedad mucho menor al 10 %. El material volátil, que se refiere a los componentes orgánicos que se evaporan cuando el material se calienta, es mucho más alta en la vara de algodón que en el estiércol bovino.

La cantidad de cenizas, que se refiere a los componentes inorgánicos que permanecen después de que el material se quema, también es mayor en el estiércol bovino que en la vara de algodón. Finalmente, el carbono fijo, que se refiere al carbono que queda después de que se queman todos los componentes orgánicos, es más alto en el estiércol bovino que en la vara de algodón.

Es importante tener en cuenta estas diferencias en la composición química de los materiales cuando se utilizan como fertilizantes o para la producción de biocombustibles, ya que pueden afectar su eficacia y su impacto ambiental. La información que proporciona el análisis próximo en la producción de biogás es importante porque muestra el contenido de carbono potencialmente disponible para la digestión anaerobia. Teniendo en cuenta que el carbono es uno de los elementos que participa en la formación de metano

4.2. Análisis de la composición química

4.2.1. Extraíbles en acetona y agua

Los resultados indican que el estiércol bovino y la vara de algodón tienen diferentes porcentajes de extraíbles de acetona y agua. El estiércol bovino presentó en promedio 7.41 % de extraíbles en acetona y 23.54 % de extraíbles en agua, como muestra la Tabla 15. Por otra parte, se obtuvieron los resultados de la vara de algodón, esta presentó en promedio 8.22 % de extraíbles en acetona y 16.72 % de extraíbles en agua, resultados mostrados en la Tabla 16.

Tabla 15. Análisis de extraíbles en acetona y agua del estiércol bovino

Muestra	% Extraíbles	
	Acetona	Agua
1	7.4534	23.8350
2	7.5473	23.3375
3	7.2504	23.4525
Promedio	7.4170	23.5417
*SD	0.1517	0.2604

*SD: desviación estándar.

Tabla 16. Análisis de extraíbles en acetona y agua de la vara de algodón

Muestra	% Extraíbles	
	Acetona	Agua
1	8.1758	16.8964
2	8.0644	16.6972
3	8.4406	16.5932
Promedio	8.2269	16.7289
*SD	0.1932	0.1541

*SD: desviación estándar.

El estiércol bovino tiene un 7.41 % de extraíbles en acetona, mientras que la vara de algodón tiene un 8.22 % de extraíbles en acetona. Esto indica que la vara de algodón tiene una mayor cantidad de compuestos solubles en acetona en comparación con el estiércol bovino. Por otra parte, el estiércol bovino tiene un 23.54 % de extraíbles en agua, mientras que la vara de algodón tiene un 16.72 % de extraíbles en agua. Esto indica que el estiércol bovino tiene una mayor cantidad de compuestos solubles en agua en comparación con la vara de algodón.

Los compuestos extraíbles en acetona y agua son compuestos generalmente volátiles de bajo peso molecular, que pueden ser degradados fácilmente por las bacterias anaerobias. Estos compuestos representan una fuente de energía para lo microorganismo que contribuye a su rápido crecimiento.

4.2.2. Porcentajes lignocelulósicos

De acuerdo con los resultados obtenidos el estiércol bovino presentó en promedio 32.41 % de lignina, 66.85 % de holocelulosa, 48.92 % de celulosa y 17.93 % de hemicelulosa como se muestra en la Tabla 17. Por otra parte, la vara de algodón presentó en promedio 27.71 % de lignina, 72.19 % de holocelulosa, 58.70 % de celulosa y 13.49 % de hemicelulosa, como se muestra en la Tabla 18.

Tabla 17. Porcentajes lignocelulósicos del estiércol bovino.

Porcentajes lignocelulósicos				
Muestra	Lignina	Holocelulosa	Celulosa	Hemicelulosa
1	32.3333	66.4715	48.9173	17.5542
2	33.3522	67.7859	49.3717	18.4142
3	31.5669	66.3164	48.4798	17.8365
Promedio	32.4175	66.8579	48.9229	17.9350
DE*	0.8956	0.8074	0.4459	0.4383

*DE: desviación estándar.

Tabla 18. Porcentajes lignocelulósicos de la vara de algodón.

Porcentajes lignocelulósicos				
Muestra	Lignina	Holocelulosa	Celulosa	Hemicelulosa
1	27.1349	71.8515	58.0745	13.7771
2	27.4438	72.6102	59.2489	13.3613
3	28.5685	72.1228	58.7831	13.3397
Promedio	27.7157	72.1948	58.7022	13.4927
DE*	0.7545	0.3844	0.5914	0.2464

*DE: desviación estándar.

El estiércol bovino presenta un porcentaje de lignina superior a la vara de algodón, lo cual pudiera indicar que el estiércol presentaría una mayor resistencia a la degradación microbiana. Sin embargo, la importancia del estiércol radica en el alto porcentaje de materia orgánica y la gran cantidad de microorganismos que intervienen en las reacciones anaerobias. Por otra parte, la composición del estiércol puede variar dependiendo de la alimentación que recibe los bovinos.

En los análisis se encontró un alto porcentaje de holocelulosa en la vara de algodón, Por lo tanto, la codigestión entre el estiércol y la vara de algodón podría resultar en una sinergia donde la vara de algodón proporciona holocelulosa y el estiércol proporciona los microorganismos que digieren la holocelulosa. En cuanto a la hemicelulosa no se observaron diferencias importantes en el contenido de hemicelulosa, esta es una fuente de carbohidratos que puede ser degradada por microorganismos para obtener energía.

4.3. Carbono orgánico

En la Tabla 19 se presentan los datos de absorbancias obtenidos para realizar la curva de calibración. A partir de la ecuación lineal se determinó las concentraciones de carbono orgánico en las muestras analizadas, la regresión lineal se muestra en la Figura 29.

Tabla 19. Absorbancias obtenidas de los estándares de sacarosa.

Estándares	g C	Absorbancia
Estándar 1	0	0.0210
Estándar 2	0.0123	0.0920
Estándar 3	0.0132	0.1110
Estándar 4	0.0256	0.1930
Estándar 5	0.0275	0.2190
Estándar 6	0.0497	0.3810
Estándar 7	0.0619	0.4900
Estándar 8	0.0941	0.6940

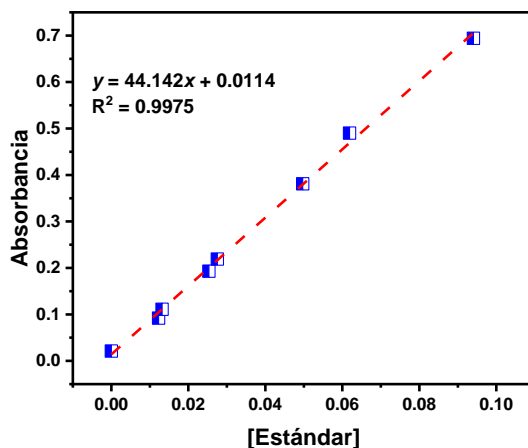


Figura 29. Regresión de la curva de calibración.

En la Tabla 20, se presentan los valores de carbono orgánico del estiércol bovino y la vara de algodón. Se puede observar que el estiércol bovino tiene un contenido de carbono orgánico mayor al de la vara de algodón. El carbono orgánico es un factor importante en la producción de biogás, ya que se descompone durante la digestión anaeróbica para generar CH₄ y CO₂.

Tabla 20. Resultados de carbono orgánico.

	Masa (kg)	Absorbancia	[C.O.] (g/kg)
Estiércol	0.0010212	0.8920	116.9269
Vara de algodón	0.0010008	0.6810	90.6313

El estiércol tiene una concentración de 116.93 g de carbono orgánico/kg de muestra un poco más alta en comparación con la vara de algodón 90.63 g de carbono orgánico/kg de muestra, es probable que el estiércol tenga un mayor potencial para la producción de biogás. Esto se debe a que una mayor concentración de carbono orgánico proporciona más sustrato para la actividad microbiana en el proceso de digestión anaeróbica, lo que podría traducirse en una mayor cantidad de biogás generado.

Una mayor concentración de carbono orgánico en el estiércol también sugiere que podría ser más eficiente en la producción de biogás en comparación con la vara de algodón. Los microorganismos responsables de la digestión anaeróbica tendrán más materia orgánica disponible para metabolizar en el estiércol, lo que podría resultar en una mayor tasa de producción de biogás por unidad de sustrato utilizado.

4.4. Demanda química de oxígeno

En la Tabla 21 se presentan los datos de absorbancias obtenidos para realizar la curva de calibración. A partir de la ecuación lineal se determinó las concentraciones de DQO en las muestras analizadas, la regresión lineal se muestra en la Figura 30

Tabla 21. Absorbancias obtenidas de la curva de calibración

[Estándar]	Absorbancia
0.2	0.1016
0.4	0.1900
0.6	0.2920
0.8	0.3716
1.2	0.5610
1.5	0.6890

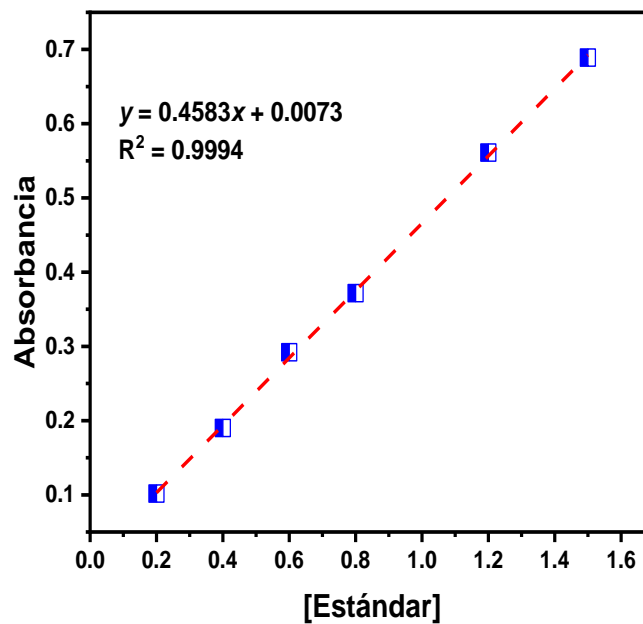


Figura 30. Regresión de la curva de calibración.

En la Tabla 22 se presentan los valores de DQO del sustrato, estiércol bovino y la vara de algodón.

Tabla 22. Resultados obtenidos de DQO

Muestra	Absorbancia	DQO (mg/L)
Estiércol bovino	0.6	1,293.25
Vara de algodón	0.9	1,947.85

El estiércol bovino y la vara de algodón presentan 1,293.25 mg/L y 1,947.85 mg/L de DQO, respectivamente. Estos residuos muestran una cantidad favorable de materia orgánica que podrían emplearse como fuente energética para la generación de biogás.

No obstante, se debe considerar que, a pesar de que la vara de algodón presenta un DQO más alto entre las muestras mencionadas, esto no garantiza necesariamente una mayor eficacia en la producción de biogás. La capacidad de una muestra para generar biogás también está influida por otros factores, tales como la composición específica de la materia orgánica presente y su facilidad de degradación por los microorganismos presentes en el sustrato.

4.5. Sólidos totales, sólidos volátiles totales y sólidos fijos totales

En la Tabla 23 se presentan los resultados obtenidos para el análisis de sólidos. Los residuos de estiércol bovino y vara de algodón se trataron en base seca por tanto estas concentraciones se expresaron en porcentaje.

Tabla 23. Resultados de sólidos totales, sólidos volátiles y sólidos fijos.

Muestra	Concentración		
	Sólidos totales	Sólidos volátiles	Sólidos fijos
Estiércol bovino (%)	27.58	21.60	6.07
Vara de algodón (%)	92.37	64.51	25.86

El estiércol bovino muestra un contenido de sólidos totales mucho más bajo en comparación con la vara de algodón, esta diferencia indica que el estiércol bovino puede contener una proporción menor de materia orgánica en relación con la vara de algodón. Por otra parte, los de sólidos volátiles que representan la fracción orgánica que puede ser convertida en biogás, el estiércol bovino también tiene un contenido más bajo en comparación con la vara de algodón. Esto indica que la vara de algodón tiene un mayor potencial para producir biogás debido a su contenido más alto de materia orgánica volátil. Por otro lado, los sólidos fijos representan la fracción inorgánica o no volátil de los residuos. En este caso, el estiércol bovino tiene una cantidad mucho menor de sólidos fijos en comparación con la vara de

algodón. Esto puede indicar que el estiércol bovino es más fácilmente degradable en comparación con la vara de algodón, lo que podría favorecer su uso en la producción de biogás. A pesar de que la vara de algodón tiene un mayor contenido de sólidos volátiles, lo que indica un mayor potencial para la producción de biogás, el estiércol bovino podría ser más favorable debido a su menor contenido de sólidos totales y sólidos fijos. Esto implica que el estiércol bovino podría ser más fácilmente digerible y tener una mayor disponibilidad de materia orgánica para la producción de biogás, a pesar de tener una proporción menor de materia orgánica.

4.6. Conductividad eléctrica, sólidos disueltos y pH

En la Tabla 24 se muestran los datos obtenidos del medidor de pH las cuales son importantes para caracterizar los residuos.

Tabla 24. Parámetros obtenidos del medidor de pH.

Muestra	Parámetros			
	Temperatura	pH	Conductividad eléctrica (μS)	Sólidos disueltos (ppm)
Estiércol Bovino	35°C	8.17	3,697	1,849
Vara de algodón		5.50	849	425

El estiércol bovino muestra un pH más alto en comparación con la vara de algodón. Este pH más alto en el estiércol bovino puede indicar una mayor alcalinidad y potencial de neutralización de ácidos durante el proceso de digestión anaeróbica.

El estiércol bovino exhibe una conductividad eléctrica mucho más alta en comparación con la vara de algodón. Esto puede deberse a una mayor concentración de sales y nutrientes en el estiércol bovino, lo que podría influir en la actividad microbiana durante el proceso de digestión anaeróbica. Las sales en concentraciones adecuadas pueden actuar como nutrientes y estabilizar el pH, lo que favorece la actividad microbiana. Sin embargo, concentraciones excesivas pueden ser perjudiciales, causando estrés osmótico y toxicidad para los microorganismos.

Por último, el estiércol bovino tiene una cantidad mayor de sólidos disueltos en comparación con la vara de algodón. Estos sólidos disueltos pueden indicar nutrientes y compuestos orgánicos que pueden ser utilizados por los microorganismos durante la producción de biogás.

4.7. Producción de biometano en los biodigestores tipo Batch, capacidad 2L

En la Tabla 25 se presentan los resultados experimentales sobre la producción de biometano en cada corrida experimental utilizando los biodigestores tipo Batch de 2L.

Tabla 25. Volúmenes obtenidos en la producción de biometano.

Tratamiento	Componentes			A	E	V	Volumen (mL)		
	Agua (A)	Estiércol (E)	Vara (V)				R1	R2	R3
T1	5	1	0.1	+1	+1	+1	57.5	58.8	59.6
T2	5	0.9	0	+1	0	-1	116.3	118.6	121.6
T3	3	0.9	0	-1	0	-1	60.3	61.7	62.3
T4	3	0.9	0.1	-1	0	+1	13.6	14.5	15.8
T5	3	1	0.1	-1	+1	+1	20.8	22.7	23.4
T6	3	1	0	-1	+1	-1	90.6	91.7	92.3
T7	5	1	0	+1	+1	-1	131.7	133.4	138.6
T8	5	0.9	0.1	+1	0	+1	46.8	47.8	48.2
T9	3	0	0.1	-1	-1	+1	0	0	0
T10	3	0	0	-1	-1	-1	0	0	0
T11	5	0	0.1	+1	-1	+1	0	0	0
T12	5	0	0	+1	-1	-1	0	0	0

En la Tabla 26 se muestran los resultados del análisis de varianza (ANOVA) expandida realizada en Minitab para evaluar el efecto de cada factor y sus interacciones en la producción de biometano y seleccionar la combinación óptima de agua, estiércol y vara de algodón en los biodigestores.

Tabla 26. Resultados del análisis de varianza para la producción biometano.

Fuente	*GL	*SSS	Contribución (%)	*SSA	*MSA	Valor F	Valor P
Modelo	7	76,069.7	98.86	76,069.7	10,867.1	346.77	0.000
Lineal	3	63,359.4	82.34	75,726.1	25,242.0	805.46	0.000
Agua	1	7,202.4	9.36	10,700.9	10,700.9	341.46	0.000
Estiércol	1	38,838.4	50.47	38,838.4	38,838.4	1,239.32	0.000
Vara	1	17,318.6	22.51	26,186.8	26,186.8	835.61	0.000
Interacciones de 2 vías	3	12,610.9	16.39	12,709.7	4,236.6	135.19	0.000
Agua*estiércol	1	3,498.8	4.55	3,498.8	3,498.8	111.64	0.000
Agua*vara	1	242.3	0.31	341.2	341.2	10.89	0.003
Estiércol*vara	1	8,869.8	11.53	8,869.8	8,869.8	28.03	0.000
Interacciones de 3 vías	1	99.5	0.13	99.5	99.5	3.18	0.086
Agua estiércol vara	1	99.5	0.13	99.5	99.5	3.18	0.086
Error	28	877.5	1.14	877.5	31.3		
Falta de ajuste	4	824.6	1.07	824.6	206.1	93.49	0.000
Error puro	24	52.9	0.07	52.9	2.2		
Total	35	76,947.2	100.00				

*GL: Grado de libertad; *SSS: Suma de cuadrados secuenciales; SSA: Suma de cuadrados ajustados *MSA: Medias de cuadrados ajustados.

De acuerdo con el análisis ANOVA se puede inferir que todos los factores y sus interacciones tienen un efecto significativo sobre la variable de respuesta, debido a que presentaron valores P menores a 0.05.

Esto sugiere que las diferencias observadas en los niveles de los factores y sus combinaciones no son debidas al azar. Con el fin de obtener más información respecto a la significancia de los factores, comparamos los valores de contribución en la variación de los efectos. Para ello, se tienen en cuenta los valores de contribución presentados en la Tabla 26 y los valores de los efectos presentados en la Tabla 27.

27. Tabla de Coeficientes Codificados del ANOVA

Término	Efecto	Coeficiente	95% CI	Valor T	Valor P	VIF
Constante		68.92	(66.59; 71.26)	60.40	0.000	
Agua	42.17	21.09	(18.75; 23.42)	18.48	0.000	1.50
Estiércol	7.304	3.652	(3.440; 3.865)	35.20	0.000	1.00
Vara	-65.97	-32.99	(-35.32; -30.65)	-28.91	0.000	1.50
Agua*estiércol	2.192	1.096	(0.884; 1.309)	10.57	0.000	1.50
Agua*vara	-7.53	-3.77	(-6.10; -1.43)	-3.30	0.003	1.50
Estiércol*vara	-3.491	-1.745	(-1.958; -1.533)	-16.82	0.000	1.50
Agua Estiércol Vara	-0.370	-0.185	(-0.397; 0.028)	-1.78	0.086	1.50

Al comparar las interacciones, se observa que los factores estiércol*vara tienen la contribución mayor con un valor de 11.53 % mostrado en la Tabla 26. Sin embargo, su efecto es negativo con un valor de -7.53, esto quiere decir que la contribución con respecto al efecto disminuye la producción de biometano.

En cambio, la interacción agua*estiércol tiene una menor contribución con valor de 4.55 % pero con un efecto positivo significativo. Esto quiere decir que la interacción mejora la producción de biometano, aunque su contribución es menor en comparación con la interacción entre estiércol y vara.

Por otro lado, la interacción agua*vara tienen una contribución mínima de 0.31 % y un efecto negativo, siendo los menos relevantes en términos de impacto positivo.

Por lo tanto, la combinación de agua y estiércol posee la mejor combinación para mejorar la producción de biometano. A continuación, se muestra en la Tabla 28 el modelo utilizado en este análisis.

28. Tabla del modelo ANOVA

S	R-sq	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)	AICc	BIC
5.59808	98.86%	98.57%	1267.22	98.35%	242.05	249.38

En el modelo se evidenció que tiene un buen ajuste y capacidad predictiva para la producción de biometano. El alto coeficiente de determinación, la baja desviación

estándar residual y los bajos valores de PRESS, AICc y BIC respaldan la eficacia del modelo en explicar y predecir la producción de biometano basada en las variables predictoras incluidas. En la Tabla 29 se muestra un identificador de los factores óptimos para la producción de biogás.

Tabla 29. Identificador de la solución.

AGUA	ESTIÉRCOL	VARA	Biometano Fit	Deseabilidad compuesta
5	1	0	133.441	0.962777

La Tabla proporciona información sobre un posible identificador específico en términos factores y niveles con base a la producción de biometano esperada, así como una medida de la deseabilidad de la solución. Esta información fue útil para identificar la condición óptima que maximiza la producción de biometano en este análisis y llevarla al biodigestor de 20 L. En la Tabla 30 se muestra la ecuación de regresión utilizada en el ANOVA.

Tabla 30. Ecuación de regresión.

$$\text{BIOMETANO} = -2.69 + 0.51 \text{ AGUA} + 5.5 \text{ ESTIÉRCOL} + 24 \text{ VARA} + 25.62 \text{ AGUA*ESTIÉRCOL} - 5.1 \text{ AGUA*VARA} - 402 \text{ ESTIÉRCOL*VARA} - 73.9 \text{ AGUA*ESTIÉRCOL*VARA}$$

La ecuación de regresión múltiple proporciona un modelo para predecir la producción de biometano en función de varias variables y sus interacciones. El coeficiente asociado a la vara es positivo. Sin embargo, el efecto neto en la producción de biometano dependerá de cómo interactúa con otras variables en el modelo, como agua. Por lo tanto, es importante interpretar los efectos en el contexto de las interacciones y considerar el efecto neto total en lugar de simplemente el coeficiente asociado a una variable individual. En la Figura 31 y 32 se muestran las gráficas factoriales de los factores individuales y de las interacciones entre ellos respectivamente.

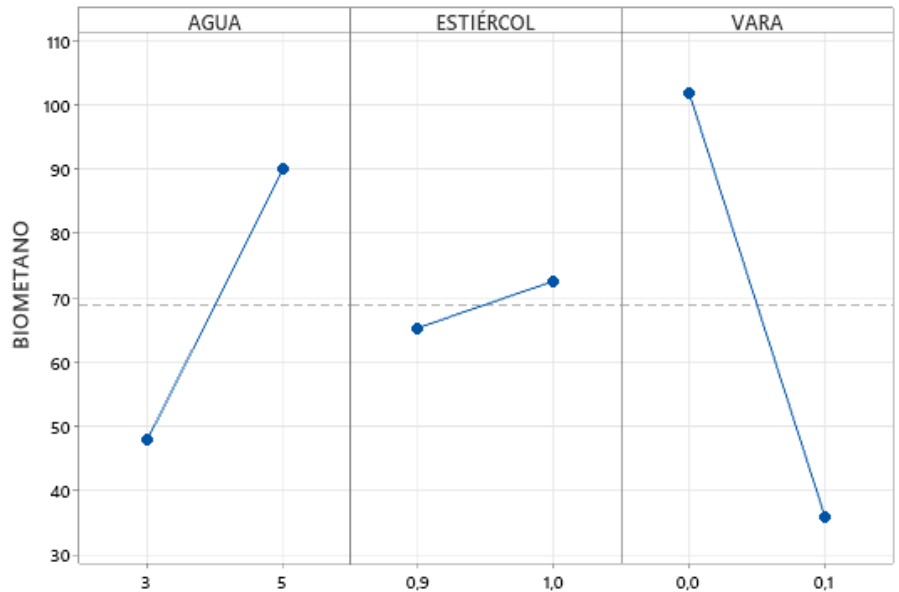


Figura 31. Gráfica factorial de cada factor de estudio.

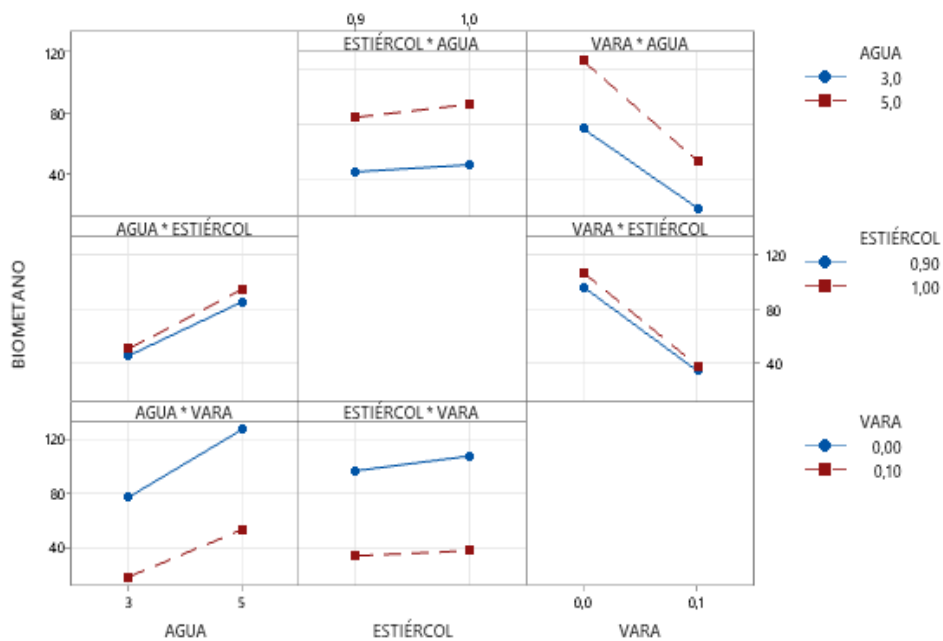


Figura 32. Gráfica factorial de las interacciones de los factores.

La gráfica factorial muestra claramente que la combinación de niveles altos de agua y estiércol resulta en una mayor producción de biometano en comparación con las demás combinaciones. Esto indica una interacción sinérgica donde la presencia de

un nivel 5 de agua mejora significativamente el efecto del estiércol en la producción de biogás.

Este comportamiento sinérgico podría ser atribuido a la mejora en las condiciones de digestión anaerobia por el agua. Este podría facilitar la mezcla y la distribución homogénea del estiércol, mejorando la accesibilidad de los microorganismos a los sustratos y, por ende, la eficiencia del proceso de digestión. Este comportamiento sinérgico es respaldado con las gráficas de contorno como se muestran en las Figuras 33 para el estiércol, Figura 34 y Figura 35.

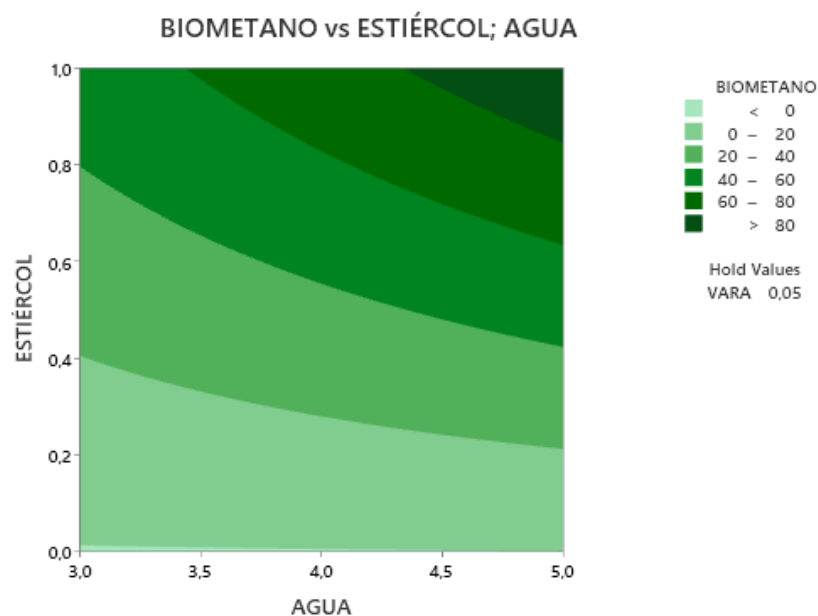


Figura 33. Gráficas de contorno ANOVA. Estiércol*Agua

Se observó una mayor producción de biometano en las interacciones Estiércol*agua. En esta gráfica de contorno, se puede apreciar que los factores agua y estiércol tienen un efecto sinérgico en la producción de biometano. Esto indicó que la combinación óptima de niveles altos de agua y estiércol tiene un impacto significativo en la actividad microbiana. Estos niveles corresponden a 5 para el agua y 1 para el estiércol. En cambio, las interacciones de Vara*Estiércol y Vara*Agua son bajas como se muestran en la Figura 34.

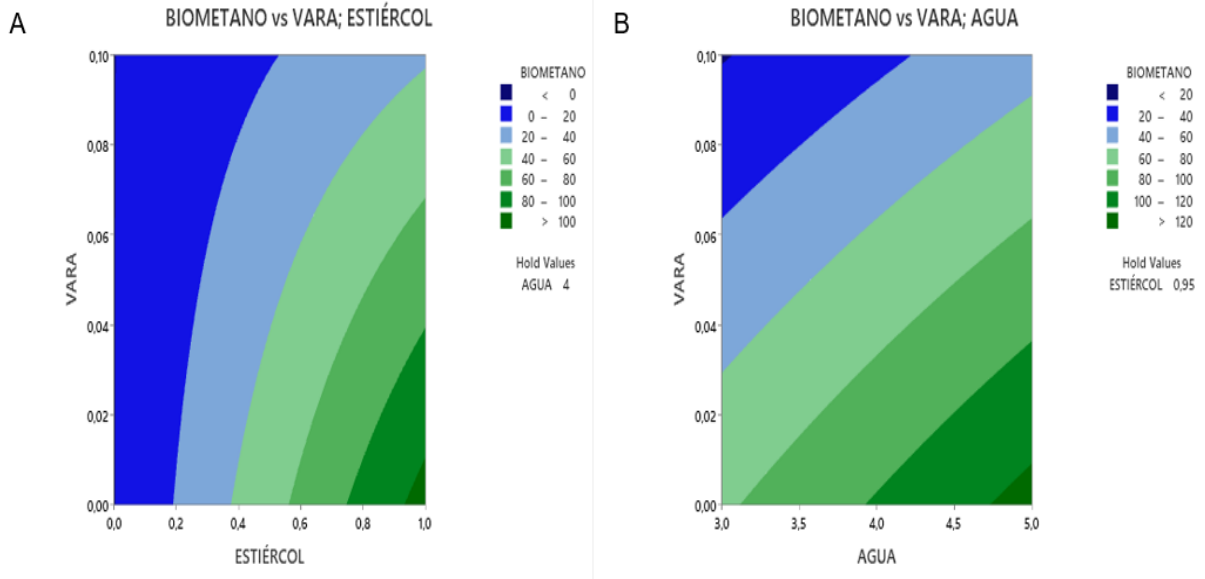


Figura 34. Gráficas de contorno de las interacciones de A) Vara*Estiércol y B) Vara*Agua

El factor Estiércol tiene un efecto más fuerte sobre la variable de respuesta en comparación con el factor Vara. Este comportamiento se refleja adecuadamente el diagrama de Pareto de los efectos estandarizados, mostrada en la Figura 35.

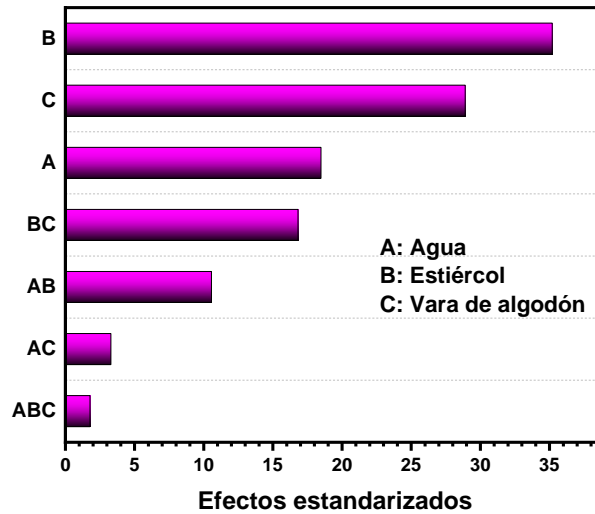


Figura 35. Diagrama de Pareto de los efectos estandarizados

Los resultados muestran que el tratamiento T7, produjo el mayor volumen de biometano después de superar el tiempo de retención. Este tratamiento corresponde a una relación 1:5, estiércol-agua, en ausencia de vara de algodón. La

vara de algodón es un residuo con alto contenido de carbono, sin embargo, la máxima producción de biometano se obtiene en ausencia de esta. Este comportamiento se puede atribuir a que la vara de algodón presenta una matriz lignocelulósica de difícil degradación para las bacterias involucradas en la digestión anaerobia. Por lo tanto, se utiliza la combinación de componentes del tratamiento T7, para la producción de biogás en el biodigestor de 20 L.

El rendimiento del tratamiento T7, se calculó con el volumen de biometano obtenido en el biodigestor de 2 L, el cual fue en promedio 0.1345 L. Luego se procedió a determinar el rendimiento del biogás. Este rendimiento se calculó considerando el volumen de biometano generado en relación con la cantidad de estiércol (0.233 kg). Esto significa que se producen aproximadamente 0.58 L de biogás por cada kg de estiércol.

4.8. Fabricado del biodigestor

4.8.1 Prototipo del biodigestor horizontal

El biodigestor horizontal es diseñado para la producción de biogás, el cual es útil como combustible y el efluente generado puede ser utilizado como fertilizante. Se realizó un prototipo en el programa AutoCAD 3d que consta de una vista del reactor. En la Figura 36 se muestra el reactor desde una vista frontal y sus componentes en la operación de producción de biogás.

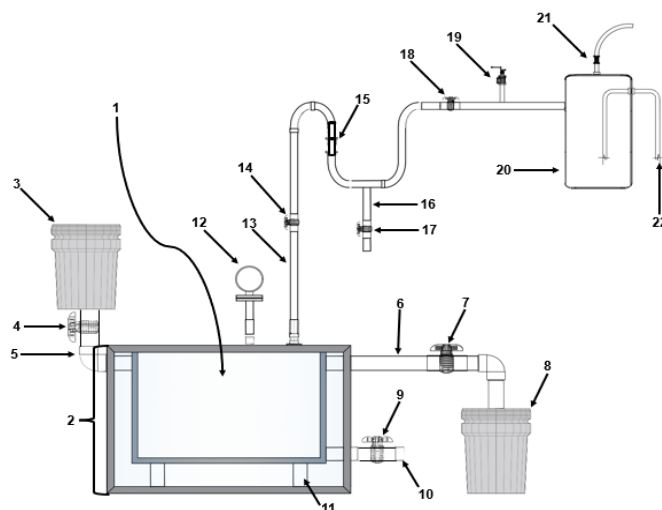


Figura 36. Vista frontal del biodigestor en AutoCAD 3d.

En la Figura 36, se ilustra la vista frontal de un biodigestor horizontal para la generación de biogás y biofertilizante a partir de residuos orgánicos, que comprende: un enchaquetado (2) para regular la temperatura, un dispositivo receptor de residuos orgánicos (3) donde se mezcla y homogeniza el sustrato con agua antes de entrar al reactor dispuesto en la zona superior izquierda de la estructura, una vez que el dispositivo se encuentra lleno, se abre la válvula (4) y pase por la tubería (5) para que ingrese el sustrato al reactor (1) donde se lleva a cabo la digestión anaerobia y esta soportado por dos bases (11). El reactor (1) cuenta con un manómetro (12) para controlar la presión. El fertilizante formado se hace pasar por la tubería (6) hasta el dispositivo de biofertilizante (8) abriendo la válvula (7) y los excesos de sólidos se purgan por la tubería (10) por medio de la válvula (9). El biogás formado emerge desde el interior del reactor (1) hacia un depósito de almacenamiento (20). En su recorrido antes de llegar a la bolsa, el biogás pasa primeramente por una tubería (13) por medio de una válvula de flujo (14). Luego, se elimina el contenido de azufre en el biogás mediante cartuchos de hierro (15). En la parte inferior de los cartuchos se tiene una válvula (17) para purgar el agua condensada en los cartuchos (15) por la tubería (16). La tubería por la que circula el biogás, válvula de control (18) y una válvula de seguridad (19) antes de llegar a al depósito de almacenamiento (20), la cual cuenta con un puerto para la toma de muestra (21) del biogás y una tubería (22).

4.8.2. Biodigestor fabricado

Los biodigestores son diseñados para la producción de biogás. Los productos que se obtienen de la biodigestión son: el biogás que se utiliza como combustible y el efluente como fertilizante. En la Figura 37, se muestra el armado del biodigestor.

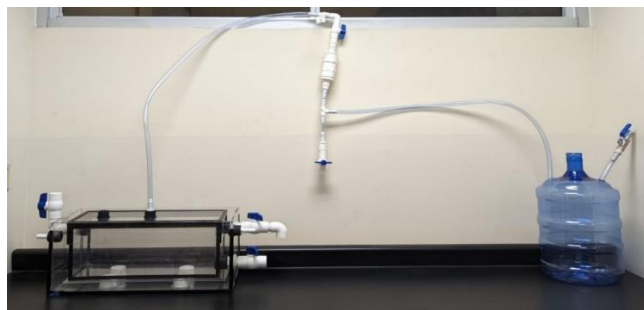


Figura 37. Biodigestor fabricado.

El biodigestor horizontal para la digestión anaerobia de residuos orgánicos está constituido por una zona de carga que se encuentra a la entrada izquierda de la figura. En esta zona ingresa el sustrato al biodigestor, controlando el ingreso mediante una válvula de paso. Al lado derecho de la figura, se encuentra la salida o descarga del biodigestor, controlado por una segunda válvula de paso. El líquido de descarga del biodigestor corresponde al biofertilizante. En la parte central de la figura se encuentra la zona biológicamente activa del biodigestor. En esta zona se descompone la materia orgánica y se produce el biogás. El biodigestor cuenta con un enchaquetado utilizado para controlar la temperatura del sustrato dentro del biodigestor como se muestra en la Figura 38. En el enchaquetado se hace pasar un flujo que agua que se encuentra a una temperatura de 35 °C. El agua es calentada utilizando una resistencia eléctrica sumergida en una cubeta cuyo volumen es de 19 L. La resistencia permite mantener la temperatura constante debido a que se encuentra conecta a un termostato.

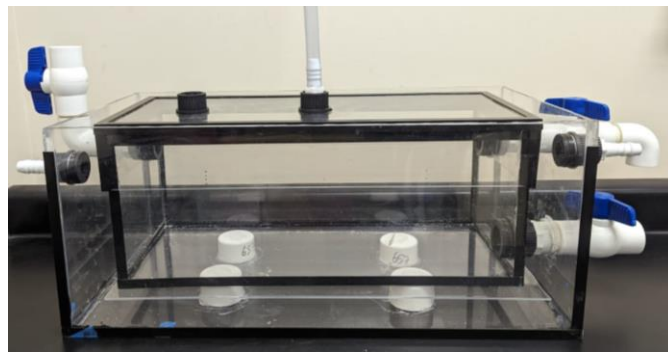


Figura 38. Vista frontal del biodigestor.

El biogás formado emerge desde el interior de reactor hacia un depósito de almacenamiento de biogás. En su recorrido antes de llegar al depósito, el biogás pasa primeramente por una llave de flujo. Luego, se elimina el contenido de azufre en el biogás mediante cartuchos de virutas de hierro. La línea de biogás presenta una salida para eliminar el agua condensada en la tubería. El agua condensada se evacúa mediante una llave de pasa que se encuentra después de los cartuchos de virutas de hierro. El biogás circulará por la tubería hasta llegar al depósito. El depósito de biogás cuenta con un puerto para la toma de muestra y una llave para regular la salida del biogás como se muestra en la Figura 39.



Figura 39. Cartuchos de hierros, purga de agua y depósito de biogás.

4.9. Producción de biogás en el biodigestor de 20 L

La producción de biogás se escaló al biodigestor de 20 L, utilizando la condición que permitió obtener la mayor cantidad de biometano en los biodigestores tipo Bach. Esta condición corresponde a la relación 5:1 agua-estiércol. El montaje del biodigestor y sus aditamentos se presentan en las Figura 40 y Figura 41 respectivamente. El biodigestor se cargó al 70% de su capacidad y se dejó en operación discontinua durante 45 días.

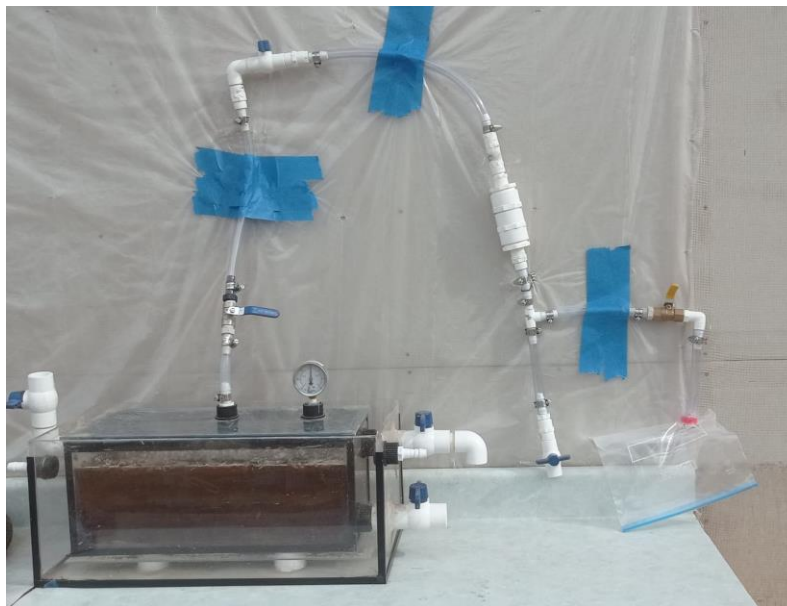


Figura 40. Biodigestor discontinuo de 20 L.

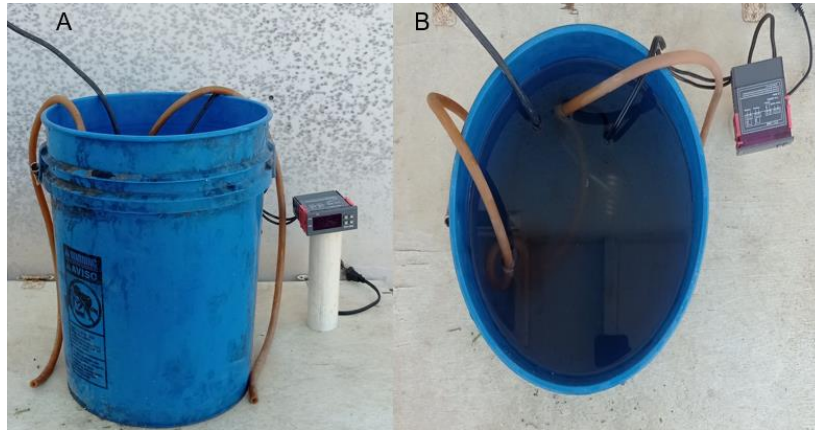


Figura 41. Sistema para el control de temperatura

La temperatura se mantuvo a 35 °C durante toda la operación utilizando una resistencia eléctrica para calentar el agua. La resistencia se conectó a un termostato para regular la temperatura. El agua fue bombeada con una bomba sumergible ubicada 40 cm por debajo del nivel del biodigestor con el fin utilizar la gravedad para recircular el agua en el sistema de calentamiento como se muestra en la Figura 41.

Durante las primeras dos semanas después de la puesta en marcha, no se observó generación de biogás. Durante este periodo las bacterias se encuentran en una etapa de adaptación y la generación de biogás es limitada. Sin embargo, en la semana tres se observó una mayor actividad microbiana al interior de biodigestor, denotada por la formación de burbuja en la superficie de la mezcla, como se aprecia en la Figura 42.



Figura 42. Burbujas al interior del biodigestor a tres semanas operación

El biogás producido se almacenó en bolsas herméticas y el volumen de gas almacenado se midió registrando el volumen de agua desplazado en una cubeta graduada. En las Figuras 43 y 44 se muestran los volúmenes de biogás generados en función del tiempo de operación, para dos corridas experimentales. La primera corrida alcanzó una producción de biogás equivalente a 5,200 mL después de los 45 días de operación. Mientras que en la segunda corrida experimental se alcanzó 5,800 mL de biogás.

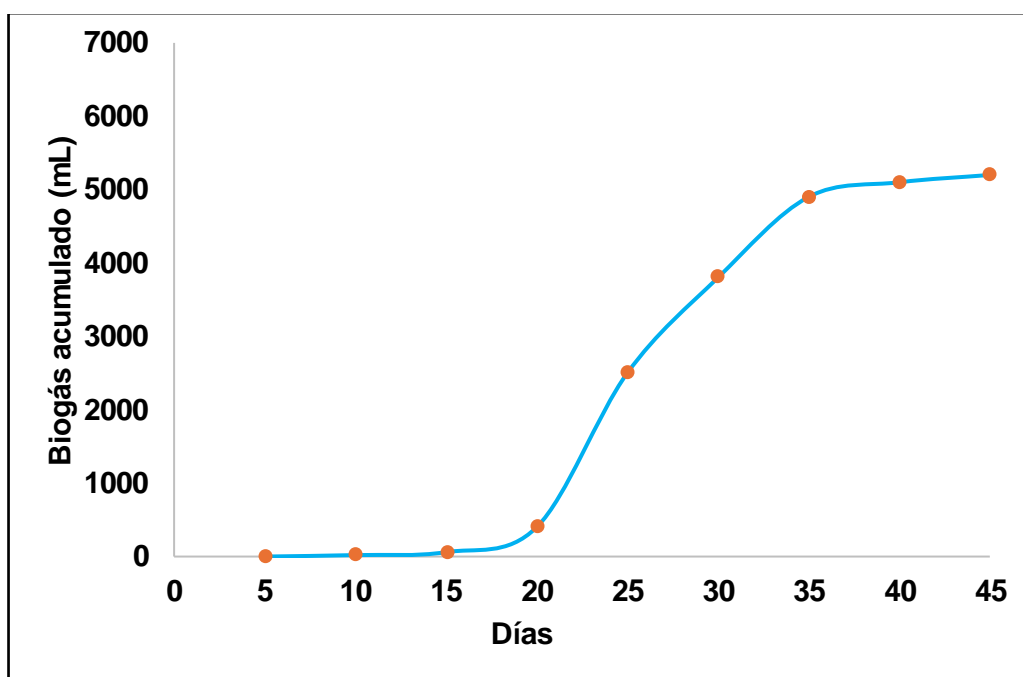


Figura 43. Primera corrida experimental con el biodigestor de 20 L

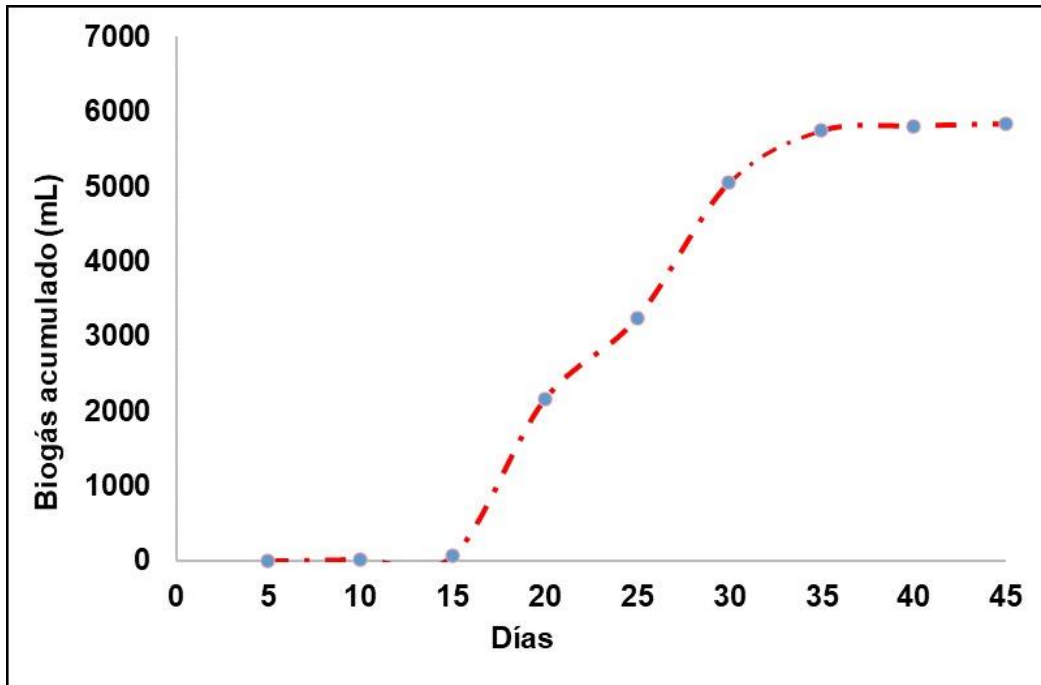


Figura 44. Segunda corrida experimental con el biodigestor de 20 L

4.10. Estimación del potencial de producción de biogás

El biodigestor de 20 L se operó a una capacidad del 70%. Esto equivale a 14 L, con base en este valor se determinaron las cantidades de los componentes de acuerdo con lo establecido en el tratamiento T7. Estos derivan de una proporción de 1 parte de estiércol por cada 5 partes de agua. Por lo tanto, se utilizaron 2.33 kg de estiércol y 11.67 kg de agua.

Teniendo en cuenta el estiércol utilizado y los volúmenes de biogás obtenidos del biodigestor de 20 L, los cuales fueron de 5.2 L y 5.8 L, se procedió a determinar el rendimiento del biogás. Este rendimiento se calculó considerando cada volumen de biogás generado en relación con la cantidad de estiércol utilizada. Esto significa que se producen aproximadamente 2.23 L y 2.48 L de biogás por cada kg de estiércol. Con estos rendimientos se procedió a estimar el potencial mínimo y máximo de producción de biogás en el valle de Mexicali.

Con los rendimientos de 2.23 L y 2.48 L de biogás por kg de estiércol, el potencial de producción de biogás se estimó multiplicando el rendimiento por la cantidad de estiércol disponible diariamente, que fue de 4,500,000 kg en 2022.

Al realizar este cálculo, se obtuvo que el potencial de producción de biogás mínimo fue de 10,035 m³ de biogás mínimo y 11,160 m³ de biogás máximo al día. Estos valores reflejan la cantidad de biogás que se podrían generar diariamente a partir de la cantidad de estiércol disponible en el valle de Mexicali.

CONCLUSIONES

Se investigó el efecto de los componentes agua, estiércol y vara de algodón sobre la producción de biogás. La investigación se realizó en primera instancia utilizando biodigestores tipo batch, en los cuales se alcanzó una producción de biometano desde 13.6 mL hasta 138.6 mL. El análisis estadístico de los resultados experimentales mostró que el estiércol es el factor de mayor importancia en la producción de biogás. Además, se encontró que el tratamiento que proporciona la mayor producción de biometano, corresponde a una relación 5:1 agua-estiércol. Por lo tanto, se recomienda utilizar el sustrato agua-estiércol para generar biogás.

Los análisis de caracterización fisicoquímica de los residuos utilizados muestran que los residuos estiércol y vara de algodón, contienen cantidades importantes de carbono, nitrógeno y DQO, los cuales potencializan la producción de biogás. Sin embargo, la mejor condición para la producción de biogás se obtiene cuando la vara de algodón no hace parte de la composición del sustrato. Esto puede atribuirse, a la matriz lignocelulósica compleja que presenta la vara de algodón, la cual es difícilmente digerida por las bacterias implicadas en el proceso de biodigestión.

Se realizó la digestión anaerobia a una escala mayor, utilizando un biodigestor discontinuo de 20 L. Se realizaron dos corridas experimentales en las cuales la cantidad de biogás acumulado después de 45 días de operación fluctuó entre 5,200 mL y 5,800 mL. Estas fluctuaciones pueden atribuirse a parámetros sensibles del proceso que pueden ser difíciles de controlar.

El potencial de producción de biogás fue de 10,035,000 L/día basado en el rendimiento, lo que refleja una oportunidad de aprovechamiento con beneficios económicos, ambientales y sociales, promoviendo un futuro energético más limpio y sustentable.

El rendimiento del biodigestor tipo batch de 2 L, fue de 0.58 L de biometano por kg de estiércol, mientras que en el biodigestor de 20 L, el rendimiento aumentó a 2.23 L de biogás por kg de estiércol, manteniendo las mismas condiciones de operación. Esta diferencia podría atribuirse a la variación en la escala del biodigestor, ya que

una mayor capacidad de procesamiento podría favorecer la eficiencia en la producción de biogás. Además, el sistema de captura de gases en los biodigestores pequeños no cuantifica el 100 % del biogás producido, lo que resalta la necesidad de una mayor precisión en la medición del biogás para obtener resultados más exactos. Estos hallazgos subrayan la importancia de considerar la escala del biodigestor de 20 L para la implementación de sistemas de producción de biogás.

En esta investigación, los rendimientos fueron de 0.58 L y 2.23 L de biogás por kg de estiércol para los biodigestores de 2 L y 20 L, respectivamente. Mientras que en la literatura se han reportado rendimientos de 40 L a 60 L de biogás por kg de estiércol bovino. Con esto se concluye que influyen muchas variables sensibles que afectaron los rendimientos en estos procesos. Uno de ellos podría ser el sistema de medición de gases y el no uso de un inóculo al inicio de la digestión para que acelere la actividad de los microorganismos.

La tecnología de biodigestión plantea retos puntuales que deben ser abordados. Estos retos están relacionados con el uso de inoculantes que potencialicen la producción de biogás y disminuyan los tiempos de retención hidráulica.

Recomendaciones y perspectivas a futuro

En la búsqueda de mejorar la producción de biogás a partir de estiércol bovino y residuos lignocelulósicos, primero, es importante controlar adecuadamente la temperatura del biodigestor para evitar cambios importantes que puedan afectar la población bacteriana dentro del biodigestor. Segundo, se recomienda utilizar inóculos en la primera etapa del proceso de digestión con el fin de acelerar la degradación de la materia orgánica y mejorar la eficiencia de la digestión.

En el futuro sería recomendable utilizar agua residual tratada para preparar las mezclas y hacer el proceso de digestión más sustentable.

ANEXOS



Academia de la OMPI

CERTIFICADO

Por el presente se certifica que

Alvaro Andres Ortiz Pérez

ha completado satisfactoriamente
el curso de enseñanza a distancia titulado

CURSO GENERAL DE PROPIEDAD INTELECTUAL

impartido del 04 de octubre al 17 de noviembre de 2022

Sherif Saadallah
Director Ejecutivo
Academia de la OMPI



334614436



ESTIMADO(A) Alvaro Andres Ortiz Perez:

Su solicitud con número de control provisional 03-2022-113016311800-01TMP, ha sido enviada y se encuentra en proceso de recepción ante el Instituto Nacional del Derecho de Autor.

Datos de la obra enviada:

Fecha de envío: 11/30/2022 04:31:18

Número de control provisional: 03-2022-113016311800-01TMP

Título: FOTO ISLA DEL SOL

Trámite: Registro de Obra

Importante: Por el momento su solicitud ha sido recibida provisionalmente ante este Instituto, una vez sujeto a dictamen, se le hará llegar una segunda notificación por este medio, en la cual se indicará la fecha, hora y número de folio asignado para su seguimiento. De igual forma, podrá consultar el estatus de esta a través de su bandeja de trámites.

Atentamente

Sistema de Registro de Obra en Línea

Aviso: Este mensaje es sólo informativo, no es necesario responder al mismo

CERTIFICADO

Registro Público del Derecho de Autor

Para los efectos de los artículos 13, 162, 163 fracción I, 164 fracción I, y demás relativos de la Ley Federal del Derecho de Autor, se hace constar que la **OBRA** cuyas especificaciones aparecen a continuación, ha quedado inscrita en el Registro Público del Derecho de Autor, con los siguientes datos:

AUTORES: ARMENTA GALVEZ EDSON ELISEO
ARMENTA GALVEZ JESUS MANUEL
AYALA BAUTISTA JOSE RAMON
CORONADO ORTEGA MARCOS ALBERTO
DUARTE JARAMILLO LAURA
GUTIERREZ ESQUIVEL LIZBETH ADRIANA
ORTIZ PEREZ ALVARO ANDRES
TORRES RAMOS RICARDO
URBANO NILA ANDREA

TÍTULO: BIOGAS A PARTIR DE ESTIERCOL BOVINO

RAMA: LITERARIA

TITULAR: UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA (CON FUNDAMENTO EN EL ARTICULO 83 DE LA L.F.D.A.)

Con fundamento en el artículo 3° de la Ley Federal del Derecho de Autor el presente certificado ampara única y exclusivamente la obra original Literaria.

Con fundamento en lo establecido por el artículo 168 de la Ley Federal del Derecho de Autor, las inscripciones en el registro establecen la presunción de ser ciertos los hechos y actos que en ellas consten, salvo prueba en contrario. Toda inscripción deja a salvo los derechos de terceros. Si surge controversia, los efectos de la inscripción quedarán suspendidos en tanto se pronuncie resolución firme por autoridad competente.

Con fundamento en los artículos 2, 208, 209 fracción III y 211 de la Ley Federal del Derecho de Autor; artículos 64, 103 fracción IV y 104 del Reglamento de la Ley Federal del Derecho de Autor; y artículos 1, 3 fracción I, 4, 8 fracción I y 9 del Reglamento Interior de Instituto Nacional del Derecho de Autor, se expide el presente certificado.

Número de Registro: 03-2022-121311005900-01

Ciudad de México, a 15 de diciembre de 2022

EL DIRECTOR DEL REGISTRO PÚBLICO DEL DERECHO DE AUTOR

JESUS PARETS GÓMEZ



CULTURA
SECRETARÍA DE CULTURA



INDAUTOR
INSTITUTO NACIONAL DEL DERECHO DE AUTOR

CERTIFICADO

Registro Público del Derecho de Autor

Para los efectos de los artículos 13, 162, 163 fracción I, 164 fracción I, y demás relativos de la Ley Federal del Derecho de Autor, se hace constar que la **OBRA** cuyas especificaciones aparecen a continuación, ha quedado inscrita en el Registro Público del Derecho de Autor, con los siguientes datos:

AUTORES: ARMENTA GALVEZ EDSON ELISEO
ARMENTA GALVEZ JESUS MANUEL
AYALA BAUTISTA JOSE RAMON
CORONADO ORTEGA MARCOS ALBERTO
DUARTE JARAMILLO LAURA
GUTIERREZ ESQUIVEL LIZBETH ADRIANA
MONTES NUÑEZ DANIELA GUADALUPE LUCIA
ORTIZ PEREZ ALVARO ANDRES
SAGASTE BERNAL CARLOS ALFONSO
URBANO NILA ANDREA

TÍTULO: EXTRACTOS Y ACEITES ESENCIALES: ESTUDIO DE SU IMPORTANCIA EN EL MEDIO AMBIENTE

RAMA: LITERARIA

TITULAR: UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA (CON FUNDAMENTO EN EL ARTICULO 83 DE LA L.F.D.A.)

Con fundamento en el artículo 3° de la Ley Federal del Derecho de Autor el presente certificado ampara única y exclusivamente la obra original Literaria.

Con fundamento en lo establecido por el artículo 168 de la Ley Federal del Derecho de Autor, las inscripciones en el registro establecen la presunción de ser ciertos los hechos y actos que en ellas consten, salvo prueba en contrario. Toda inscripción deja a salvo los derechos de terceros. Si surge controversia, los efectos de la inscripción quedarán suspendidos en tanto se pronuncie resolución firme por autoridad competente.

Con fundamento en los artículos 2, 208, 209 fracción III y 211 de la Ley Federal del Derecho de Autor; artículos 64, 103 fracción IV y 104 del Reglamento de la Ley Federal del Derecho de Autor; y artículos 1, 3 fracción I, 4, 8 fracción I y 9 del Reglamento Interior de Instituto Nacional del Derecho de Autor, se expide el presente certificado.

Número de Registro: 03-2022-121310594400-01

Ciudad de México, a 15 de diciembre de 2022

EL DIRECTOR DEL REGISTRO PÚBLICO DEL DERECHO DE AUTOR

JESÚS PARETS GÓMEZ



CULTURA
SECRETARÍA DE CULTURA



INDAUTOR
INSTITUTO NACIONAL DEL DERECHO DE AUTOR

CERTIFICADO

Registro Público del Derecho de Autor

Para los efectos de los artículos 13, 162, 163 fracción I, 164 fracción I, y demás relativos de la Ley Federal del Derecho de Autor, se hace constar que la **OBRA** cuyas especificaciones aparecen a continuación, ha quedado inscrita en el Registro Público del Derecho de Autor, con los siguientes datos:

AUTORES: ARMENTA GALVEZ EDSON ELISEO
ARMENTA GALVEZ JESUS MANUEL
AYALA BAUTISTA JOSE RAMON
CORONADO ORTEGA MARCOS ALBERTO
DUARTE JARAMILLO LAURA
GUTIERREZ ESQUIVEL LIZBETH ADRIANA
ORTIZ PEREZ ALVARO ANDRES
URBANO NILA ANDRES

TÍTULO: ACEITES ESENCIALES COMO INGREDIENTES ACTIVOS PARA EL PADECIMIENTO DE LA PEDICULOSIS

RAMA: LITERARIA

TITULAR: UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA (CON FUNDAMENTO EN EL ARTICULO 83 DE LA L.F.D.A.)

Con fundamento en el artículo 3° de la Ley Federal del Derecho de Autor el presente certificado ampara única y exclusivamente la obra original Literaria.

Con fundamento en lo establecido por el artículo 168 de la Ley Federal del Derecho de Autor, las inscripciones en el registro establecen la presunción de ser ciertos los hechos y actos que en ellas consten, salvo prueba en contrario. Toda inscripción deja a salvo los derechos de terceros. Si surge controversia, los efectos de la inscripción quedarán suspendidos en tanto se pronuncie resolución firme por autoridad competente.

Con fundamento en los artículos 2, 208, 209 fracción III y 211 de la Ley Federal del Derecho de Autor; artículos 64, 103 fracción IV y 104 del Reglamento de la Ley Federal del Derecho de Autor; y artículos 1, 3 fracción I, 4, 8 fracción I y 9 del Reglamento Interior de Instituto Nacional del Derecho de Autor, se expide el presente certificado.

Número de Registro: 03-2022-121310472600-01

Ciudad de México, a 15 de diciembre de 2022

EL DIRECTOR DEL REGISTRO PÚBLICO DEL DERECHO DE AUTOR

JESÚS PARETS GÓMEZ



CULTURA
SECRETARÍA DE CULTURA



INDAUTOR
INSTITUTO NACIONAL DEL DERECHO DE AUTOR

CERTIFICADO

Registro Público del Derecho de Autor

Para los efectos de los artículos 13, 162, 163 fracción I, 164 fracción I, y demás relativos de la Ley Federal del Derecho de Autor, se hace constar que la **OBRA** cuyas especificaciones aparecen a continuación, ha quedado inscrita en el Registro Público del Derecho de Autor, con los siguientes datos:

AUTORES: ARMENTA GALVEZ EDSON ELISEO
ARMENTA GALVEZ JESUS MANUEL
AYALA BAUTISTA JOSE RAMON
CORONADO ORTEGA MARCOS ALBERTO
DUARTE JARAMILLO LAURA
GUTIERREZ ESQUIVEL LIZBETH ADRIANA
ORTIZ PEREZ ALVARO ANDRES
URBANO NILA ANDREA

TÍTULO: SISTEMA DE GESTION INTEGRAL DE CASCARA DE NARANJA RESIDUAL EN MEXICALI, BAJA CALIFORNIA

RAMA: LITERARIA

TITULAR: UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA (CON FUNDAMENTO EN EL ARTICULO 83 DE LA L.F.D.A.)

Con fundamento en lo establecido por el artículo 168 de la Ley Federal del Derecho de Autor, las inscripciones en el registro establecen la presunción de ser ciertos los hechos y actos que en ellas consten, salvo prueba en contrario. Toda inscripción deja a salvo los derechos de terceros. Si surge controversia, los efectos de la inscripción quedarán suspendidos en tanto se pronuncie resolución firme por autoridad competente.

Con fundamento en los artículos 2, 208, 209 fracción III y 211 de la Ley Federal del Derecho de Autor; artículos 64, 103 fracción IV y 104 del Reglamento de la Ley Federal del Derecho de Autor; y artículos 1, 3 fracción I, 4, 8 fracción I y 9 del Reglamento Interior de Instituto Nacional del Derecho de Autor, se expide el presente certificado.

Número de Registro: 03-2022-120711222700-01

Ciudad de México, a 14 de diciembre de 2022

EL DIRECTOR DEL REGISTRO PÚBLICO DEL DERECHO DE AUTOR

JESÚS PARETS GÓMEZ



CULTURA
SECRETARÍA DE CULTURA



INDAUTOR
INSTITUTO NACIONAL DEL DERECHO DE AUTOR



Zapopan, Jalisco a 6 de febrero de 2024.

Álvaro Andrés Ortiz Pérez
Autor

Presente.

Estimado **Álvaro Andrés Ortiz Pérez**, me es grato comunicarle que su obra titulada: Avances en Agricultura Sostenible y Cambio Climático, del que forma parte el capítulo de su autoría: "Potencial de producción de biogás a partir de estiércol bovino"; se evaluó con su previa autorización, por analistas de esta casa editorial, como: libro científico susceptible de ser publicable y comercializable.

El resultado fue altamente positivo por lo que le informo que se decidió editarlo y fue publicado con el I.S.B.N.: 978-84-19799-92-0, en su descripción digital, de formato EPUB.

Se trata de una obra que por su calidad ha servido para crecer nuestro catálogo así como el acervo cultural de esta casa editorial.

Todo el personal que forma parte de esta empresa agradecemos la confianza depositada y su labor desempeñada.

Sin otro asunto que tratar al respecto quedo de usted:

Muy atentamente

Edición
Astra Ediciones
Tel. movil: 3336775025



Universidad Autónoma de Baja California
Instituto de Ciencias Agrícolas



XXVI Congreso Internacional en Ciencias Agrícolas

Gestión del agua y seguridad alimentaria ante el escenario de cambio climático

otorgan la presente
CONSTANCIA

A: **Álvaro Andrés Ortiz Pérez**, Marcos Coronado Ortega, Ricardo Torres Ramos, Mary Triny Beleño

Por su participación como **PONENTE EN CARTEL** con el tema:

**POTENCIAL DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE ESTIÉRCOL
BOVINO**

"POR LA REALIZACIÓN PLENA DEL SER"

Mexicali, Baja California, 26 y 27 octubre de 2023

Dr. Daniel González Mendoza
Director del instituto de Ciencias Agrícolas

Dra. Silvia Mónica Avilés Marín
Presidenta del Comité Organizador



Facultad de
Ingeniería y
Negocios
San Quintín



Villahermosa Tabasco, 04/11/2023

Asunto: Carta de Aceptación

ALVARO ANDRES ORTIZ PEREZ, MARCOS ALBERTO CORONADO ORTEGA, RICARDO TORRES RAMOS, MARY TRINY BELEÑO, RUBEN ENCINAS FREGOSO.

PRESENTE:

Estimado(s) autor(es), por medio de la presente se le(s) comunica que después de haber sido revisado rigurosamente por el comité científico, su trabajo titulado:

POTENCIAL DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE ESTIÉRCOL BOVINO.

Ha sido aceptado para su presentación en la modalidad: CARTEL.

Que corresponde al área temática:

MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO SUSTENTABLE.

Es importante que revise el programa final del evento el cual será publicado en la página oficial del mismo: congresos.ujat.mx/ciqsea, para que ubique la hora y la sala de presentación de este.

Atentamente

ATENTAMENTE

DR. ABRAHAM GÓMEZ RIVERA
PRESIDENTE DEL COMITÉ ORGANIZADOR



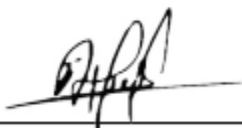
OTORGA LA PRESENTE

CONSTANCIA

A

*Álvaro Andrés Ortiz Pérez, Marcos Alberto Coronado
Ortega, Ricardo Torres Ramos, Mary Triny Bebeño y
Rubén Encinas Fregoso*

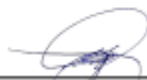
Por haber presentado el cartel: "Potencial de producción de biogás a partir de estiércol bovino", en la categoría Experimental a nivel posgrado, dentro de las actividades del 4º Congreso Internacional de Química Sustentabilidad Energética y Ambiental "Dr. Mario Molina Henríquez", modalidad virtual, llevado a cabo del 27 de noviembre al 01 de diciembre de 2023.



Dra. Hermicenda Pérez Vidal
Directora de la División Académica
de Ciencias Básicas



DIVISIÓN ACADÉMICA DE
CIENCIAS BÁSICAS



Dr. Abraham Gómez Rivera
Presidente del Comité Organizador

Cunduacán, Tabasco 01 de diciembre de 2023



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO
SUPERIOR DE ESCÁRCEGA



Otorga la presente

Constancia

A:

ALVARO ANDRÉS ORTIZ PÉREZ

POR HABER PARTICIPADO COMO PONENTE EN EL IER. CONGRESO ESTUDIANTIL DE DIFUSIÓN Y DIVULGACIÓN DE LA CIENCIA CON EL TEMA "POTENCIAL DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE ESTIÉRCOL BOVINO EN BAJA CALIFORNIA". EL 01 DE DICIEMBRE DE 2023.

"Por la Superación del Sur y la Grandeza de Campeche"



SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA
INSTITUTO TECNOLÓGICO
SUPERIOR DE ESCÁRCEGA
DIRECCIÓN

JULIO CESAR MONTERO SARMIENTO
DIRECTOR GENERAL

Escárcega, Campeche a 01 de diciembre de 2023



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



CAMPECHE
GOBIERNO DE TODOS



COMITÉ DE TURISMO Y CONVENCIONES
MEXICALI

Otorga el presente

RECONOCIMIENTO

**A: ALVARO ANDRÉ ORTIZ
PÉREZ**

Por haber participado en la Segunda edición del
Festival Aeroespacial "Mexicali en las alturas" el día 26 de
Noviembre del 2022 en la ciudad de Mexicali, Baja California.



NANCY PAOLA MINOR IBARRA
Directora general del Comité de
Turismo y Convenciones de Mexicali



MÁS ALLÁ
DEL ÉXITO

Tu camino
a la trascendencia

CERTIFICADO PARTICIPANTE

«MÁS ALLÁ DEL ÉXITO»

Otorgado a:

ÁLVARO ANDRÉS ORTIZ PÉREZ

Por su participación en el movimiento de liderazgo y crecimiento personal
Más allá del éxito por el Dr. John C. Maxwell.

«La vida de cada persona es una historia.
Tú determinas cuán grandiosa será la tuya».
- John C. Maxwell



Dr. John C. Maxwell
Fundador

John Griffin
Director de Programas
Globales

EQUIP